Nos 13-14 31 OCTOBRE 1939

# Revue générale des Sciences pures et appliquées

FONDATEUR : L. OLIVIER (1890-1920).
DIRECTEURS : J.-P. LANGLOIS (1910-1923), L. MANGIN (1924-1937).
DIRECTEUR :
R. ANTHONY, Professeur au Muséum national d'Histoire Naturelle.

Adresser tout ce qui concerne la rédaction à M. le Médecin-Capitaine Gaston DOIN, Hôpital mixte, Vernon (Eure).



## CHRONIQUE ET CORRESPONDANCE

### Inconvénients et origine de l'acidité des sols cultivés.

#### LES INCONVÉNIENTS DE L'ACIDITÉ

En ce qui concerne la plupart des plantes cultivées, les terres doivent avoir une réaction aux environs de la neutralité, c'est-à-dire accuser un pH = 6,5 à 7,5.

Rappelons que le symbole pH (puissance Hydrogène) a été adopté à la suite des nouvelles théories émises sur l'origine de la réaction des sols. C'est une façon indirecte de représenter la concentration en ions Hydrogène (ions H) dont dépend l'acidité. On sait que les ions sont des fragments de molécules électrisés.

Pratiquement il suffit de savoir que pH = 7 représente la neutralité. Les valeurs de pH inférieures à 7 indiquent l'acidité, tandis qu'au-dessus de 7 il s'agit de l'alcalinité. Ces deux réactions sont d'autant plus prononcées que l'on s'éloigne davantage de 7 dans les deux sens.

L'excès d'alcalinité est nuisible comme l'excès d'acidité. Mais le premier cas ne se rencontre que dans quelques situations particulières, alors qu'il est fréquent de trouver des terres acides.

En général dans ces dernières on voit diminuer de plus en plus les rendements des récoltes. On dit que ce sont des terres paresseuses, des terres empoisonnées, en un mot des terres malades : c'est la maladie de l'acidité du sol.

L'affaiblissement de la productivité est dû, évidemment, à des conditions de vie défavorables pour les plantes, qui peuvent jaunir prématurément et même se dessécher.

E. von Oldershausen, acidifiant la terre avec de l'acide sulfurique, ou de l'acide chlorhydrique, a constaté, entre autres, que si le végétal languit dans un tel sol c'est non seulement par suite de l'acidité mais aussi à cause des modifications des propriétés physiques et de l'appauvrissement en principes fertilisants échangeables, appauvrissement consécutif à la « débasification ».

L'acidité nuit non seulement aux propriétés physiques mais encore aux propriétés chimiques et aux propriétés biologiques de la terre.

Les sols acides deviennent lourds, compacts, difficiles à travailler. L'humidité s'y accumule, favorisant les parasites végétaux et gênant l'aération. Le pouvoir respiratoire des racines se trouve entravé. En sol neutre, ou alcalin, sain et fertile, ces organes souterrains sont plus forts, plus vigoureux, plus ramifiés qu'en sol acide. Si l'acidité est grande, comme dans les terres de bruyère, les racines s'amollissent et dégénèrent.

Le pouvoir absorbant d'une terre acide est diminué dans une proportion importante. Les engrais appliqués à haute dose ont des effets limités et le fumier lui-même se transforme lentement.

La réaction du sol agit sur la croissance des plantes en influençant les rapports nutritifs et la toxicité des constituants de la terre. Il est bien établi que les changements de réaction peuvent entraîner la mobilisation ou l'immobilisation de certains principes tels que la potasse, la chaux, l'acide phosphorique, le manganèse, l'alumine, le fer, etc. S'il y a mobilisation de principes utiles, ou immobilsaton de principes nuisibles, la plante peut en bénéficier. Dans le cas où il se produit mobilisation de substances

nuisibles, ou immobilisation de substances utiles, le végétal peut manifester des troubles de déséquilibre nutritif.

La flore microbienne, à laquelle sont dus de multiples phénomènes biologiques, accompagnés de réactions chimiques utiles pour la vie des plantes, est affectée également dans les sols acides.

Il y a ralentissement de l'activité des agents ammonisants et des microbes nitrificateurs, des microbes fixateurs de l'azote de l'air (Azotobacter), des bactéries des légumineuses, etc.

D'après R. Chaminade, chef de travaux à la Station d'agronomie et de biologie des sols de Versailles, l'ammonisation a lieu entre pH = 3,7 et pH = 9, avec un optimum de 7 à 8,5. La nitrification est considérablement ralentie par des pH bas. Elle se produit entre pH = 3,7 et pH = 8,8, avec un optimum de très faible à pH inférieur à 5 et notablement entravée jusqu'à pH = 6,2.

Les microbes fixateurs de l'azote de l'air voient leur développement arrêté quand le pH est inférieur à 6 (Chaminade).

En résumé les infiniment petits utiles demandent en général, pour leur pullulation, que la réaction du sol soit aussi voisine que possible de la neutralité, c'est-à-dire à pH = 7.

Par contre les microbes dénitrificateurs, qui sont des agents nuisibles, sont moins abondants dans les terres acides que dans les terres alcalines.

On comprend que les plantes qui croissent dans les conditions particulièrement défavorables que nous venons d'exposer, deviennent facilement la proie des maladies.

Nous rappellerons cependant que I. P. Somov, par l'addition d'acide sulfurique à un certain nombre de variétés de « tchernozem russe », a pu augmenter leur productivité jusqu'à 413 % en introduisant ainsi l'ion H dans le complexe absorbant. Pendant la première période qui suivit l'addition d'acide la teneur en nitrates augmenta considérablement. Il en fut de même en ce qui concerne l'acide phosphorique. Ces expériences, qui ont été poursuivies pendant trois ans, ont été faites en pots.

On a fait remarquer encore qu'il est des sols qui, quoique à réaction acide bien accusée, ne s'en portent pas plus mal, c'est-à-dire qu'ils donnent des produits abondants et de qualité.

Il est curieux aussi de voir des terres qui reçoivent certaines eaux d'arrosage et d'épandage contenant des quantités élevées d'acide sulfurique donner abondamment des légumes.

### Origine de l'acidité

Les chimistes-agronomes considèrent plusieurs formes d'acidité dans les sols agricoles, qui se différencient par leur origine, leurs caractères chimiques ou physiologiques et leurs conséquences. Ainsi on peut distinguer l'acidité organique de l'acidité minérale.

Cette dernière, l'acidité minérale, est due à la constitution géologique même de la terre. On la rencontre surtout dans les terrains siliceux ou argilo-siliceux et silico-argileux, les terres de limon des plateaux. D'après H. Niklas (Allemagne) les sols de grès bigarrés et de terre rouge sont ordinairement acides.

Sous l'action du froid et de la chaleur, du gaz carbonique, de l'oxygène, les silicates doubles d'alumine et d'une base secondaire, chaux, potasse, soude, etc., sont désagrégés, décomposés et finalement laissent une combinaison acide, le silicate d'aluminium. A l'état pur l'argile (silicate d'alumine hydraté) a une réaction acide.

D'expériences effectuées sur des terres acides dans l'Orégon (Etats-Unis), expériences rapportées par H. Robinson, il semble résulter que les dimensions des particules terreuses, la présence de colloïdes ou de matière organique dans la portion argileuse du sol, ou bien la composition différente de chacune des portions terreuses, n'ont pas une grande influence sur la concentration respective d'ions Hydrogène et par conséquent sur leur acidité.

Les acides organiuqes proviennent de la décomposition des matières végétales ou animales. Leur présence est fréquente dans les sols marécageux, tourbeux, les landes défrichées, les vieilles prairies. On les rencontre souvent dans les terres mal drainées, trop humides, trop imperméables, insuffisamment travaillées, où ils ont tendance à s'accumuler. Ils sont plus abondants aussi dans les terrains dépourvus de calcaire capable de les saturer, comme les terres granitiques de Bretagne, du Massif central, des Vosges, des Pyrénées, etc.

Aux Etats-Unis on a constaté que c'est en général la décomposition des feuilles d'arbres qui produit l'acidité organique.

Cette acidité peut être neutralisée par l'alcalinité du sol, d'une part, quand le phénomène se continue même sans intervention de la chaux du sol, les acides se décomposent spontanément et la réaction devient alcaline, au bout d'un an pour les feuilles d'érable, et de plusieurs années pour celles de pin, par exemple.

D'après S. D. Conner (Etats-Unis) l'acidité due aux acides organiques n'est que peu nuisible. Il semble même que la matière organique diminue la toxicité des acides plus actifs. On a écrit aussi que l'acidité faible de l'humus est moins dangereuse que l'acidité forte des sels minéraux dissociés, les sels d'alumine en particulier.

Selon V. Vincent, directeur de la Station agronomique de Quimper (Finistère), l'humus doit être considéré comme le principal agent de l'acidité d'origine organique; mais il ne représente qu'une fraction bien faible de l'acidité totale engendrée par la décomposition des matières enfouies. L'auteur estime que pour les sols étudiés la quantité totale des acides organiques est telle qu'il faudrait par hectare et par an 400 kg de chaux pour la neutraliser.

August Schuckenberg a montré que les acides humiques libres, qui sont la cause de la décomposition des sels neutres engrais, sont déjà par eux-mêmes, c'est-à-dire en l'absence de sels neutres, net-

tement nuisibles au développement des plantes, le mécanisme de cette nocivité restant d'ailleurs assez obscur.

D'après P. Robinson et R. Williams (Angleterre) l'acidité du sol dépend de la présence combinée des acides alumino-siliciques, des acides humiques et de leurs sels. Les acides libres l'emportent sur la phase saline selon le degré d'acidité ou de « désaturation » par rapport à la substance basique.

Selon J. Tidmore et F. Parker (Etats-Unis) la concentration des ions H, dans les solutions de sol, est due en grande partie à l'acidité des silicates acides.

Avec les nouvelles théories physico-chimiques concernant la réaction du sol on considère, en général, 4 sortes d'acidité.

Ainsi le Dr Kappen distingue l'acidité libre ou active, l'acidité d'échange, l'acidité hydrolitique, l'acidité organique.

L'acidité libre se détermine par la concentration des ions H (certains auteurs l'appellent acidité spécifique, ou acidité ionique).

L'acidité d'échange dépend principalement des acides minéraux. Elle est due aux silicates d'aluminium, de fer et de manganèse. On la mesure par la réaction d'un sel d'acide fort, le nitrate de potassium par exemple (méthode Hopkins).

L'acidité hydrolitique peut se déterminer en déduisant l'acidité d'échange de l'acidité totale mesurée par l'eau de chaux ou par l'acétate de calcium (méthode J. S. Jones). L'acidité totale comprend l'acidité d'échange, l'acidité hydrolitique et l'acidité organique. On la détermine comme il vient d'être dit.

En déduisant du degré d'acidité totale, déterminé suivant la méthode Jones, celui qui a été constaté avec le procédé Hopkins (nitrate de potassium) pour l'acidité d'échange, on obtient avec beaucoup d'approximation la mesure de l'acidité organique.

Lenglen classe les diverses acidités du sol suivant l'ordre dans lequel elles sont le plus nuisibles : acidité active ou effective, acidité humique, acidité d'échange, et une quatrième forme précurseur de l'acidité d'échange.

L'acidité active caractérise les terres marécageuses. Elle paraît due à des sels acides, ou à des acides libres. Elle est assez rare et ne se rencontre jamais dans les terres de nature minérale.

L'acidité humique résulte de la décomposition des sels neutres. Elle n'apparaît que dans les sols très chargés d'humus. Les acides humides sont faibles et par suite peu nuisibles, mais ils peuvent le devenir en décomposant certains sels engrais, comme le sulfate d'ammoniaque, le chlorure et le sulfate de potassium, en s'emparant de leur base et en libérant leur acide.

L'acidité d'échange se rencontre dans les terres minérales. Elle se manifeste surtout par l'emploi des sels potassiques et des sels azotés. Ainsi, entre le chlorure de potassium et les silicates provenant de la désagrégation des roches il se produit une action d'échange ; la potasse se combine aux silicates, qui libèrent alors du calcium, du magnésium et du sodium entrant en combinaison avec l'acide chlorhydrique et passant en solution dans l'eau. Si le fer et l'alumine participent à l'échange de bases, il se forme des sels de fer et d'alumine dont la réaction est nettement acide et l'action sur la végétation absolument défavorable. D'après Ruprecht, de la Station de Massachusetts (Etats-Unis), les sels d'aluminium sont toxiques à de faibles concentrations pour les plantes cultivées, tandis que les carex, les renoncules, la petite oseille, caractéristiques des sols acides, résistent plus facilement.

Quant à la quatrième forme d'acidité, précurseur de l'acidité d'échange, elle est, dit Lenglen, moins nuisible que cette dernière, et sa présence n'empêche pas d'obtenir encore des récoltes passables ; mais elle constitue une indication qu'il est temps d'intervenir et d'apporter de la chaux.

Pour S. D. Conner l'acidité d'échange est la plus nuisible parce qu'elle provoque dans le sol la formation des ions Hydrogène et des ions Aluminium, tous nuisibles à la croissancce des plantes.

D'après Boischot, directeur de la Station d'agronomie d'Antibes, l'acidité minérale d'échange prend naissance dans les terres décalcifiées par l'action des radicaux acides des engrais sur les sels de fer et d'alumine. Cette acidité est d'autant plus dangereuse qu'elle se manifeste lentement sans que l'agriculteur puisse souvent la soupçonner.

August Schuckenberg dit que l'action nocive de l'acidité de double échange, qui résulte de l'action des sels neutres (à acide fort et à base forte) sur le sol, avec formation de sels d'aluminium correspondants, peut être attribuée soit à la concentration en ions H qui en résulte, soit à la toxicité des sels d'aluminium. C'est à cette dernière cause que l'auteur rapporte l'action nocive constatée. Quant à l'acidité hydrolitique elle ne s'est pas montrée nuisible dans les expériences qu'il a entreprises sur le blé, le seigle, l'orge et l'avoine. Mais il reste à voir si pour d'autres plantes l'action nocive ne se manifesterait pas.

D'après Goy, Müller et Roos les sols de pH supérieur à 5,5 n'ont plus d'acidité d'échange.

Selon R. Chaminade la croissance des végétaux est influencée par le pH du sol dans lequel ils se développent. Cette influence ne provient pas d'une action directe de la concentration en ions H sur l'organisme des plantes, mais de la liaison entre ce facteur et les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. L'acidité est constituée en majeure partie par une acidité insoluble liée à l'état de saturation du complexe absorbant. Plus la proportion de cations métalliques fixée par celui-ci est grande plus le pH de la suspension de sol est élevée.

A. Rolet,
Ingénieur agronome.

# LA NOTION DE PHOTON

A l'heure actuelle, il ne fait de doute pour personne que des transformations importantes dans nos conceptions fondamentales de la physique sont nécessaires pour surmonter les difficultés qui s'opposent au développement de la théorie des quanta. De nombreux travaux paraissent, qui se donnent pour tâche d'examiner dans quel sens doivent se produire ces transformations. C'est à ce point de vue que nous voudrions procéder ici à l'étude critique d'une des plus anciennes notions de la mécanique des quanta, *la notion de photon*.

1. On sait comment en 1905, à propos de l'étude de l'effet photoélectrique, EINSTEIN fut amené à introduire les *quanta de lumière* ou photons comme élément essentiel de la description des propriétés du rayonnement électromagnétique. Il s'agissait, rappelons-le, d'expliquer le fait que l'énergie des électrons émis par une plaque de métal frappée par un rayonnement électromagnétique de fréquence $\nu$ ne dépend pas de l'intensité de ce rayonnement (c'est-à-dire de l'importance du champ électrique agissant sur les électrons), mais est une fonction linéaire de $\nu$; c'est le nombre d'électrons émis qui augmente avec l'intensité du rayonnement. C'était là évidemment quelque chose qui contredisait formellement les conséquences habituelles de la théorie électromagnétique. On devait en effet s'attendre d'une part à ce que les électrons ne soient extraits que si l'amplitude des vibrations électromagnétiques dépasse un certain minimum (correspondant à l'importance de la liaison électronique) et d'autre part que l'énergie des électrons extraits soit en relation directe avec cette amplitude, sans que la fréquence y joue de rôle sensible.

La contradiction était encore plus frappante lorsqu'on étudiait l'effet photoélectrique avec des rayonnements d'intensité très faible. On trouvait que même avec des intensités extraordinairement petites, l'énergie des électrons extraits était toujours la même, uniquement déterminée par la fréquence du rayonnement incident. On pouvait calculer l'énergie électromagnétique reçue par seconde par un centimètre carré de la surface étudiée et mesurer d'autre part le nombre et l'énergie des électrons extraits : on arrivait ainsi à la conclusion remarquable que malgré sa petite surface apparente (au plus $10^{-16}$ cm$^2$) chacun des oscillateurs électroniques dissociés par la lumière avait absorbé une partie beaucoup plus grande de l'énergie électromagnétique que sa surface apparente ne lui en donnait « le droit ».

Pour concilier ce fait expérimental avec le principe de conservation de l'énergie, on était amené avec EINSTEIN à imaginer que l'énergie électromagnétique n'était pas distribuée uniformément (tout au moins pour les très faibles intensités) sur la surface de l'onde lumineuse, mais concentrée en quelques points de cette onde (ou tout au moins en quelques régions très localisées de l'onde). On comprenait ainsi le phénomène de « tout ou rien » qu'est l'effet photoélectrique : l'énergie n'étant pas uniformément répartie, l'extraction des électrons n'avait lieu que lors de la rencontre d'une de ces parties fortement énergétiques avec un oscillateur électronique qui recevait alors l'intégralité du contenu énergétique de l'onde.

D'autre part on pouvait expliquer les autres traits de l'effet photo-électrique en admettant que chacune de ces régions privilégiées emportait une énergie

$$W = h\nu \qquad (1)$$

où $h$ est la constante de PLANCK, d'où le nom de *quanta de lumière* (ou photons) qui devait être désormais attaché à ces portions privilégiées de l'onde électromagnétique. On se rattachait ainsi à l'idée de PLANCK d'après laquelle les échanges de rayonnement ont toujours lieu par multiples entiers du quantum $h\nu$ et on comprenait ainsi que si $W_0$ était l'énergie de liaison de l'électron à l'intérieur du métal, $W_e$ son énergie cinétique après extraction, on avait

$$W_e - W_o = W = h\nu \qquad (2)$$

d'où la loi linéaire entre $W_e$ et $\nu$ que nous avons signalée plus haut et qui devait fournir, on le sait, une des méthodes les plus précises dont nous disposions actuellement pour la détermination de la constante de PLANCK.

2. Mais la théorie des quanta de lumière d'EINSTEIN posait à son tour des problèmes d'une grande difficulté : il s'agissait avant tout des rapports entre quanta de lumière et onde électromagnétique. La conception de régions énergétiquement privilégiées sur l'onde était en effet étrangère à la théorie de MAXWELL, contradictoire avec celle-ci. Il n'était pas possible d'autre part de renoncer dans ce cas à la théorie ondulatoire, de revenir à une théorie corpusculaire à la façon des théories qui précédèrent la théorie de FRESNEL : comme PLANCK le faisait remarquer à EINSTEIN lors des discussions qui suivirent l'exposé de cette théorie, la définition du photon faisait appel à la fré-

quence $\nu$, donc à une notion ondulatoire, étrangère à la théorie corpusculaire proprement dite.

Cela était encore plus clair si l'on examinait, à la lumière des idées nouvelles, la théorie des phénomènes caractéristiques de la nature ondulatoire de la lumière. Sans doute, L. DE BROGLIE devait montrer que l'application de la cinématique de la relativité au « corpuscule lumineux » permettait de lever les objections relatives à la théorie de la réfraction de la lumière qu'après la célèbre expérience de FOUCAULT sur la mesure de la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, on avait crues fatales à la théorie corpusculaire. Mais les phénomènes d'interférence et de diffraction devaient réserver à cette théorie des difficultés de principe particulièrement graves.

On obtient en effet exactement les mêmes figures d'interférence avec un dispositif optique donné en utilisant une lumière intense pendant quelques instants ou une lumière très faible pendant un temps suffisamment long. Par exemple, la lumière sera si faible qu'il n'arrivera sur la plaque photographique où s'enregistre la figure d'interférence qu'un photon par jour. Mais si on attend suffisamment longtemps (quelques années ici), le cliché sera identique à celui obtenu en une très faible fraction de seconde avec de la lumière intense (grand nombre de photons incidents sur la plaque photographique par seconde).

Or, si l'on admet, avec EINSTEIN, que l'énergie n'est pas emportée par les ondes, mais par des corpuscules lumineux, ces corpuscules sont indépendants les uns des autres : il n'y a pas de forces entre photons, comme l'exige le principe de superposition. Au reste, il apparaît clairement que si les photons se succèdent à la cadence d'un par jour, il ne peut être question d'influence réciproque entre eux. Or il nous faut rendre compte alors des interférences à très grande différence de marche, du phénomène d'interférences lui-même avec sa périodicité caractéristique. Si l'on prend un point au centre d'une raie sombre d'après l'optique classique, nous ne verrons aucun photon y parvenir : tout se passe dans une certaine mesure comme si chaque photon interférait avec lui-même, comme si la figure d'interférences n'était autre que la superposition des figures d'interférences correspondant aux arrivées successives des différents photons. L'onde apparaît ainsi liée au photon d'une manière énigmatique : elle *guide* son trajet, l'empêchant d'aller là où doit exister une frange obscure. Mais la relation entre onde et corpuscule n'est pas épuisée par là : ne faut-il pas comprendre le fait que l'onde est électromagnétique, déterminée par les équations de Maxwell et d'autre part que son énergie n'est pas répartie suivant les mêmes équations de Maxwell ?

3. La découverte, vingt ans après, de l'*effet Compton* devait donner un argument nouveau aux tenants de la conception corpusculaire de la lumière. En somme, la différence n'est pas si essentielle entre l'effet photoélectrique et l'effet Compton : il s'agit ici d'un électron libre : de la lumière de fréquence $\nu$ vient le frapper; si on observe la lumière qu'il diffuse sous l'angle $\theta$, la fréquence de ce rayonnement diffusé $\nu'$ est différente de $\nu$ :

$$\frac{1}{\nu'} = \frac{1}{\nu} + \frac{h}{mc^2}(1 - \cos\theta). \qquad (3)$$

Cela signifie que l'électron a absorbé une partie de l'énergie lumineuse. En effet, s'il était au repos avant d'être frappé par l'onde électromagnétique, on vérifie expérimentalement que son énergie cinétique est maintenant

$$W_e = h\nu - h\nu'. \qquad (4)$$

Tout se passait en fait, tant au point de vue de la conservation de l'énergie que de la conservation de la quantité de mouvement, comme si la diffusion de lumière par l'électron avec changement de fréquence (effet Compton) était parfaitement assimilable au choc de deux sphères élastiques, l'électron et le photon. On remarquera toutefois sur (3) comme sur (4) que si l'on y fait $h = 0$, c'est-à-dire lorsqu'on passe du domaine de la théorie quantique à celui de la théorie classique, l'effet Compton disparaît : il n'y a pas de changement de fréquence qui apparaît ainsi comme un effet quantique caractéristique.

Ainsi l'effet Compton confirmait dans cette opinion que la lumière, tout au moins sous l'aspect de ses échanges énergétiques avec la matière, peut être considérée comme formée de « corpuscules lumineux », les photons.

4. On sait comment cette association entre corpuscules lumineux et ondes électromagnétiques fut à l'origine de la conception de la *mécanique ondulatoire* de L. DE BROGLIE. Le parallélisme entre les propriétés de la matière et de la lumière devait le conduire à associer aux corpuscules matériels, les électrons, des ondes, tout comme on avait été conduit à associer des corpuscules lumineux aux ondes de Maxwell. Telle fut l'origine de la théorie quantique moderne de l'atome dont les succès furent au reste beaucoup plus remarquables du côté de la matière que du côté de la lumière. Alors qu'on perfectionnait sans cesse nos connaissances sur les propriétés des « ondes matérielles » en particulier avec la théorie relativiste de l'électron magnétique de Dirac, il n'apparaissait pas que des progrès bien importants dussent être enregistrés quant aux propriétés des ondes lumineuses.

Sans doute saisissait-on mieux, grâce aux discussions sur les conséquences générales de la notion de quantum d'action (en particulier en ce qui concerne ce qu'on appelle souvent principe d'indétermination) la possibilité de concilier la théorie de Maxwell et la notion d'échanges discontinus d'énergie entre matière et lumière, mais il apparaît bien que dès lors deux conceptions fort différentes (et que l'on ne distingue pas suffisamment à notre avis) des rapports entre photons et ondes vont se faire jour. C'est ce que nous allons voir maintenant.

5. La première conception est au fond celle d'EINSTEIN : elle consiste à mettre tout l'accent sur la détermination ponctuelle des échanges d'énergie. Du moment que, comme il apparaît bien de l'effet photoélectrique et de l'effet Compton, toute l'énergie assignée par la théorie de Maxwell à une onde peut être entièrement transférée à un électron rencontré par un point de cette onde, c'est que ce point en était effectivement porteur. Le photon est donc un point (ou si l'on veut un corpuscule), en tout point assimilable à l'électron. Du fait de son rôle dans des échanges d'énergie, c'est à lui qu'est conférée toute la réalité du phénomène lumineux et l'onde n'apparaît que comme une méthode symbolique destinée à concilier l'existence des corpuscules lumineux et l'aspect ondulatoire de la lumière, de guider les photons vers les régions que l'optique ondulatoire classique leur assigne.

C'est le programme de cette conception que développe M. Louis DE BROGLIE [1] quand il écrit :

« L'interaction entre un photon et un élément matériel ne doit pas être forcément différente de l'interaction entre deux éléments matériels. Elle devrait donc se représenter en mécanique ondulatoire par une équation d'ondes valable pour le système photon + particule électrisée et portant sur la fonction d'ondes de ce système. On obtiendrait ainsi, dans cette représentation analytique du « choc » d'un photon et d'un élément matériel, des échanges d'énergie se faisant par quanta parce que les deux parties du système, photon et particule matérielle, seraient l'une et l'autre des particules soumises aux lois des quanta ».

Nous allons voir que cette conception corpusculaire extrême se heurte à des difficultés essentielles.

6. Nous sommes partis pour définir le photon avec EINSTEIN, de l'idée de localisation ponctuelle ou quasi-ponctuelle de l'énergie lumineuse. Examinons donc tout d'abord ce que l'on peut entendre par cette localisation.

Comme l'onde associée au photon marque la distribution de celui-ci dans l'espace (la probabilité de le trouver en tel ou tel point), dire que le photon est en un point déterminé $xyz$ à un instant déterminé $t$, c'est, suivant le langage de la mécanique ondulatoire, former un paquet d'onde qui n'est sensiblement différent de zéro qu'au point $xyz$ à l'instant $t$. Soit alors à former un paquet d'onde d'extension inférieure à $\Delta x$, $\Delta y$, $\Delta z$ autour du point $xyz$ pendant un temps $\Delta t$ autour de l'instant $t$. L'onde la plus générale peut s'écrire en intégrale de Fourier

$$u(x,y,z,t) = \int A(k_1,k_2,k_3)e^{i(k_1x+k_2y+k_3z-\omega t)}dk_1, dk_2, dk_3. \quad (5)$$

C'est la superposition d'ondes planes de fréquence $\omega$ donnée par

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 \quad (6)$$

et de direction de propagation fixée par les cosinus directeurs

$$\frac{ck_1}{\omega}, \frac{ck_2}{\omega}, \frac{ck_3}{\omega}.$$

d'amplitude A variant avec la fréquence et la direction de propagation.

Dans ces conditions, pour former le paquet d'ondes cherché, il suffit que l'amplitude A $(k_1, k_2, k_3)$ ne soit différente de zéro autour d'une certaine valeur $k_1$, $k_2$, $k_3$ que dans l'intervalle

$$\Delta k_1, \Delta k_2 \Delta k_3,$$

donné par

$$\Delta x \Delta k_1 \sim 1 \qquad \Delta y \Delta k_2 \sim 1 \qquad \Delta z_3 \Delta k_3 \sim 1 \quad (7)$$

et avec

$$\Delta \omega \Delta t \sim 1 \quad (8)$$

S'il en est ainsi, les ondelettes composant le paquet d'ondes d'après (5) s'annulent par interférences en dehors de l'élément d'espace-temps

$$\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t.$$

Revenons alors aux relations (7) et (8). Si nous voulons préciser la position du photon, il nous faut diminuer $\Delta x$, mais $\Delta k$ doit augmenter en conséquence. Donc, *plus la position du photon est bien précisée*, plus est imprécisée sa fréquence. A la limite, pour être assuré que le photon se trouve au point $xyz$ à l'instant $t$, il faudrait faire A = 1 : toutes les fréquences entrent en jeu avec la même importance, il ne peut plus être question de parler de la « fréquence » du photon [2].

1. La matière et le rayonnement, p. 64.

2. C'est là la définition de la fameuse fonction $\delta$ de Dirac, nulle partout sauf en un point où elle est infinie d'une certaine manière :

$$\delta(a) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} e^{aix}dx.$$

Réciproquement, si la fréquence (et la direction de propagation) sont connues avec une grande précision, la position du photon est beaucoup moins précise. A la limite où la fréquence est parfaitement connue (ainsi que la direction de propagation), une seule exponentielle subsiste dans (5), l'intégration disparaît, mais toutes les positions $xyz$ sont également possibles, on ne peut plus parler de localisation du photon.

Or nous avons vu que ce qui caractérise la notion de photon suivant EINSTEIN, c'est d'une part la localisation en une très petite portion de l'espace de l'énergie, d'autre part le fait que cette énergie est donnée par (1). Mais il apparaît dès lors, après ce que nous venons de voir que ces deux caractères sont incompatibles. Si l'on part de (1), la fréquence est déterminée, mais la localisation n'est pas possible. Si la localisation a lieu, la fréquence s'étale : la relation (1) n'est plus satisfaite. C'est au fond la vieille idée bien connue en optique qu'un train d'ondes n'est rigoureusement monochromatique que s'il a une extension indéfinie (dans l'espace et dans le temps).

Pratiquement, nous pourrons dire que la position d'un photon ne peut jamais être connue à moins d'une longueur d'onde près, de même que nous ne pouvons espérer le localiser durant un temps qui soit inférieur à sa période, sans quoi le concept même de photon basé sur la relation (1) perd toute possibilité d'application. Mais dire qu'il n'est pas possible de localiser le photon à moins d'une longueur d'onde, c'est en fait dire qu'il n'est pas possible d'utiliser la notion de photon « corpuscule de lumière » en dehors de l'optique géométrique. C'est en effet la longueur d'onde de la lumière utilisée qui délimite les domaines de l'optique géométrique et de l'optique ondulatoire.

Notre conclusion sera donc la suivante : *la notion de photon, corpuscule lumineux, ne peut être utilisée que dans les limites de l'optique géométrique.* En somme, c'est bien là le développement logique de l'objection de PLANCK à la notion de photon, dont nous avons parlé au début du § 2.

Ainsi, le rayon lumineux sera la trajectoire du photon; mais, si l'on pénètre dans le domaine de l'optique ondulatoire, la notion de corpuscule lumineux sera aussi peu applicable que la notion de rayon.

7. Il est bon de nous arrêter sur ce point, car nous sommes là en présence d'une différence essentielle entre la lumière et les électrons. Si nous appliquons en effet les raisonnements du paragraphe précédent aux électrons, nous obtenons des résultats différents : par suite de l'existence d'une masse au repos, la relation entre $\omega$ et $k$ n'est pas donnée par (6) pour les électrons mais par

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 + \frac{m^2c^2}{h^2} \qquad (6 \text{ bis})$$

où $m$ est la vitesse de l'électron, $h$ la constante de PLANCK divisée par $2\pi$. Si $v$ est la vitesse de l'électron,

$$v_x = \frac{c^2 k_1}{\omega},\quad v_y = \frac{c^2 k_2}{\omega},\quad v_z = \frac{c^2 k^3}{\omega}$$

et l'on montre que l'on peut toujours déterminer la position de l'électron (par exemple avec le fameux microscope à rayons $\gamma$ de HEISENBERG) avec une erreur de l'ordre de $\frac{c}{\omega}$, alors que la longueur d'onde de DE BROGLIE associée à l'électron est

$$\lambda = \frac{c}{\omega}\,\frac{1}{\sqrt{1-\frac{m^2c^4}{h^2\omega^2}}} = \frac{c}{\omega}\cdot\frac{c}{v} \qquad (9)$$

donc beaucoup plus grande en général (tout au moins dans le domaine des vitesses non relativistes).

Donc, même dans le domaine de l'optique ondulatoire électronique, nous avons le droit de parler de la position de l'électron, alors que dans ce domaine ondulatoire il ne peut plus en être question pour le photon.

La situation serait évidemment différente si le photon possédait une masse, mais l'influence de celle-ci ne pourrait jouer que pour les fréquences suffisamment basses. Comme l'a montré L. DE BROGLIE [3], la masse propre du photon (en dehors de la masse $\frac{h\nu}{c^2}$) est certainement inférieure à $10^{-44}$ grammes, soit $10^{16}$ fois plus petite que la masse de l'électron. Le facteur $\frac{c}{v}$ n'atteint 1,01 que pour une longueur d'onde supérieure à *trente kilomètres*, cas où la question de la position du photon perd évidemment tout sens.

8. D'ailleurs, comme le fait remarquer DIRAC [4], on se heurte à d'autres difficultés quand on observe que le photon doit posséder, comme le montre l'expérience, une *polarisation*, qui n'est pas une propriété corpusculaire simple. Si l'on peut assigner à une onde plane de direction de propagation bien déterminée un certain état de polarisation (rectiligne, circulaire ou elliptique), il n'en est pas de même si l'on considère un photon comme une perturbation électromagnétique localisée dans un très petit volume : ici encore

3. L. DE BROGLIE : Thèse.

4. DIRAC : Principles of Quantum Mechanics, 2e édition, p. 195.

se retrouvent les difficultés du paragraphe 6. Si l'onde plane est un élément simple de polarisation, il ne peut en être de même du corpuscule lumineux. Dans le langage de la théorie des quanta, les variables caractérisant la polarisation de la lumière permutent avec la quantité de mouvement, mais pas avec la position. Ainsi en parlant de « corpuscule lumineux », on s'interdit par là de prendre en considération la polarisation de la lumière, soit un de ses caractères essentiels.

9. Il s'ensuit de tout ce qui précède, dès lors, qu'il n'est pas possible d'établir entre l'onde et le photon la même relation qu'entre l'électron et l'onde qui lui est associée. Pour s'exprimer plus clairement, il n'est pas possible d'établir des équations d'onde du photon dans le même sens dont on parle des équations d'onde de l'électron. L'équation d'onde de l'électron nous fournit en effet la probabilité de présence de l'électron en un point quelconque de l'espace et la formulation même de cette indication nous montre que la possibilité de localiser l'électron en une région arbitrairement petite de l'espace en est la condition, la possibilité d'interprétation univoque de ses résultats.

Or nous venons de voir qu'il est impossible — tout au moins dans le domaine ondulatoire — de donner un sens à l'expression « position du photon ». Il doit logiquement en résulter l'impossibilité de définir une probabilité de présence des photons, une équation d'ondes du photon, tout au moins dans la mesure où l'on attribue la même signification à l'équation d'onde pour le photon et l'électron (Nous verrons plus loin à propos des recherches de M. Louis DE BROGLIE le sens de cette restriction).

En fait il a été jusqu'ici impossible, malgré les théories très générales sur les équations d'onde dont nous disposons depuis la théorie des spineurs, de donner une équation d'onde du photon qui rende compte de ses caractères de polarisation, qui satisfasse aux conditions de relativité et qui de plus conduise à une *densité de présence définie positive*. Ce dernier point doit retenir notre attention. Il est clair que si la notion de présence du photon en une région déterminée de l'espace a un sens, la probabilité correspondante doit être toujours positive (ou nulle).

Si par exemple, avec LANDAU et PEIERLS, on admet que la fonction d'onde du photon, pour rendre compte de la polarisation, doit être un tenseur du second ordre, on se heurte à l'impossibilité de former quadratiquement à partir de la fonction d'onde un quadrivecteur densité-courant. Plus récemment, dans la théorie de M. Louis DE BROGLIE, « la grandeur $\rho$... n'est pas définie positive... Dès lors il ne paraît plus possible de considérer $\rho d\pi$ comme la probabilité de présence du photon dans l'élément de volume $d\pi$. Ceci conduit à penser que, pour le photon, la localisation ne doit pas être une « observable » au sens de DIRAC. La détermination des coordonnées du photon ne serait pas, même en principe, physiquement possible. C'est d'ailleurs une idée sur laquelle M. PAULI a depuis longtemps attiré l'attention. Il convient d'ailleurs de remarquer à ce sujet que, dans le champ d'interférences des ondes du photon, c'est la valeur locale du champ électrique et non celle de la quantité $\rho$ qui doit donner la probabilité d'interaction du photon avec la matière »[5].

Ainsi il n'est pas possible de parler de probabilité de présence d'un photon comme on parle de probabilité de présence d'un électron. L'annulation de cette densité (ou des fonctions d'onde) en un point déterminé n'a pas de sens physique particulier et ne nous garantit nullement que le photon n'exerce aucune action aux points où la densité ainsi définie est nulle.

10. Ainsi la notion de photon n'a pas le même champ d'application, la même *permanence* que celle d'électron. Cela tient au fond à ce que l'électron est défini par des éléments intrinsèques, sa charge électrique, sa masse au repos. Sa charge en particulier est un invariant relativiste. Au contraire le photon est défini par la relation $W = h\nu$ qui n'offre aucun caractère invariant. La couleur du photon varie selon le système d'observation, il n'a pas de masse intrinsèque (tout au moins dans la théorie courante comme nous l'avons vu à la fin du § 7). D'autre part, le principe de conservation de la charge nous assure de la *permanence* des électrons. Au contraire les photons naissent et disparaissent continuellement par suite de leur interaction avec la matière qui les émet et les absorbe.

Naturellement on peut imaginer avec DIRAC[6] qu'il existe comme une sorte d'*état zéro* pour les photons : un photon ne disparaîtrait pas lors de son absorption, il passerait dans cet état zéro, inobservable, d'où il serait tiré d'une émission : ainsi le nombre de photons se conserverait tout comme le nombre d'électrons. Mais c'est là une hypothèse bien artificielle et qui n'a jusqu'ici eu que le caractère d'une fiction mathématique.

Ceci nous conduit d'ailleurs à examiner une autre difficulté de la notion de photon, celle qui

5. L. DE BROGLIE : Nouvelles recherches sur la lumière, p. 26.
6. DIRAC : Quantum mechanics, 2e édition.

est liée aux processus d'ordre supérieur où interviennent plusieurs photons. Dans l'application de la notion de photon à l'effet photoélectrique ou à l'effet Compton, il ne s'agissait en effet que d'un photon (dans le cas de l'effet Compton, on peut toujours imaginer que le photon diffusé est le photon incident qui a subi une modification de son énergie). On peut alors se poser la question suivante : peut-on représenter l'interaction du champ électromagnétique avec un système matériel par la somme des interactions entre ce système matériel et les divers photons qui composent le champ électromagnétique? DIRAC[7] a examiné le problème en se bornant aux processus de dispersion (second ordre) et il trouve que cela est *presque* possible, mais pas complètement : on ne peut obtenir ainsi des processus qui, à vrai dire, sont peu importants en général, mais dont l'existence n'en est pas moins nécessaire pour la conservation de l'équilibre thermodynamique. C'est par exemple le phénomène suivant : le système matériel est dans le premier état excité, la différence d'énergie avec le niveau fondamental étant $E_1$. On fait tomber sur ce système excité une radiation de fréquence $\nu$ telle que $h\nu$ soit inférieure à $E_1$. L'équilibre thermodynamique (avec l'effet Raman) exige alors que le système matériel retourne à l'état fondamental en émettant trois photons de fréquence $\frac{E_1}{h} - \nu$, $\nu$, $\nu$ . Mais on saisit facilement qu'un tel processus ne peut s'expliquer avec une théorie où les photons sont indépendants les uns des autres : on pourrait tout juste obtenir deux photons : $\frac{E_1}{h}$, $\nu$ mais en aucun cas trois. Si l'on voulait poursuivre dans cette voie, il serait nécessaire de renoncer à l'hypothèse des photons indépendants les uns des autres, il faudrait imaginer des « forces entre photons ». Mais on voit qu'ici nous nous éloignons considérablement des bases mêmes de la théorie des photons, c'est-à-dire de la théorie électromagnétique : en particulier l'idée de « forces entre photons » paraît peu compatible avec le principe de superposition : nous le verrons bien davantage lorsqu'il sera question de la théorie électromagnétique non linéaire de Born.

On le voit, ce qui précède nous conduit à ne voir dans le photon qu'un moyen utile, mais limité dans son champ d'action, de définir les échanges d'énergie dans certains phénomènes simples, entre matière et champ électromagnétique.

11. M. Louis DE BROGLIE a cherché dans divers travaux une autre méthode pour prolonger le domaine d'application de la notion de photon. Il cherche à préciser la relation entre champ électromagnétique et fonction d'onde attachée au photon.

Le champ électromagnétique est lié à la transition du photon d'un état à l'état d'annihilation : « Du point de vue physique, les champs électromagnétiques de la lumière peuvent être considérés comme des grandeurs réglant les échanges d'énergie entre matière et rayonnement. Pour parler le langage probabiliste de la physique quantique, on peut dire que ces champs déterminent la probabilité des transitions subies par le corpuscule « photon », transitions qui correspondent aux échanges d'énergie entre le photon et les éléments matériels. Nous devons donc chercher à définir les grandeurs électromagnétiques attachées au photon comme des grandeurs liées à des transitions « photoélectriques » subies par le photon, ces transitions devant avoir... le caractère très particulier d'être accompagnés d'une sorte d'annihilation du photon »[8].

L. DE BROGLIE conçoit le photon comme l'association de deux particules élémentaires d'énergie $\frac{h\nu}{2}$, de spin 1/2, satisfaisant à l'équation de Dirac. Par fusion des deux équations de Dirac, on obtient une équation à 16 composantes pour un corpuscule de spin (1,0, — 1) qui serait celle du photon. Le « demi-photon » pourrait n'être rien d'autre que le *neutrino*[9] que les principes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement conduisent à introduire dans la théorie des désintégrations $\beta$.

L'intérêt de cette conception « dualiste » du photon serait que d'après un principe général de mécanique quantique[10] vérifié sur les noyaux atomiques, la statistique à laquelle satisfait une particule dépend de la parité du nombre de ses constituants. Mais tout d'abord cette règle n'est pas démontrée lorsqu'il s'agit de fusions aussi intimes que celles dont il s'agit dans le cas du photon, puis FIERZ[11] a montré que le genre de statistique est en liaison étroite avec le caractère entier ou non entier du spin de la particule considérée, de sorte que la statistique de BOSE-EINSTEIN va avec les valeurs entières du spin (comme c'est justement le cas pour les photons).

D'autre part, l'identification de ces demi-photons avec les neutrinos reste un problème auquel aucun début de solution n'a été apporté. La fusion des deux neutrinos en un photon (et la dissociation possible de celui-ci) est par ailleurs un pro-

7. DIRAC : *loc. cit.* p. 243.

8. Une nouvelle conception de la lumière, p. 25.
9. J. SOLOMON : Protons, neutrons, neutrinos. Paris (1939).
10. EHRENFEST et OPPENHEIMER : *Phys. Rev.*, 37, 1931, p. 333.
11. M. FIERZ, *Helv. Phys. A.*, 12, 1939, p. 3.

cessus dont la nature échappe à la théorie même du photon. A ce point de vue rappelons que JORDAN et de KRONIG [12] ont essayé de développer une conception du photon représenté comme combinaison de deux neutrinos qui laisse un rôle important à ces derniers. En somme, pour eux, les neutrinos représentent la réalité du champ électromagnétique tandis que le photon ne représente qu'un aspect de leurs combinaisons possibles. L'absorption ou l'émission d'un photon résulte simplement d'une sorte d'effet Raman sur le champ de neutrinos. Mais si cette théorie présente ce côté séduisant de conférer une réalité aux neutrinos dont est composé le champ électromagnétique, elle se heurte à de très grosses difficultés mathématiques qui semblent bien être insurmontables, en particulier en ce qui concerne la statistique des photons, qu'on doit retrouver à partir de la statistique de PERMI-PAULI à laquelle satisfont les neutrinos.

Nous nous arrêterons là en ce qui concerne ces théories « corpusculaires » de la lumière. On a vu du reste d'après M. L. DE BROGLIE lui-même (§ 9) que d'une part la théorie du photon ne permet pas de construire une densité de présence définie positive et d'autre part que c'est le champ électrique et non cette densité de présence qui doit donner la probabilité d'interaction du photon avec la matière. Cela semble bien marquer que la différence entre les propriétés des électrons et de la lumière est plus grande qu'il n'avait semblé il y a quelques années et que pour ce qui est de la lumière, il convient de mettre au premier plan les équations de Maxwell conçues comme les véritables équations d'onde de la lumière, des photons dans certains cas particuliers comme nous l'avons vu.

12. Nous allons maintenant passer à l'examen d'une conception toute différente du photon. Dans tout ce qui précède, en parlant de photon, on pensait toujours de façon plus ou moins précise à un corpuscule de lumière : c'était donc là un *concept ponctuel*, tout comme l'électron que considère la mécanique quantique. Le concept nouveau de photon que nous allons introduire est, en relation avec la théorie de la quantification des champs, un concept de champ, un concept *global, de totalité.*

C'est la théorie du rayonnement du corps noir ou plus précisément de l'interaction de celui-ci avec la matière qui a été à l'origine de cette conception si essentielle actuellement dans notre physique des champs. Pour éviter la « catastrophe ultra-violette », PLANCK avait été conduit à supposer que les oscillateurs matériels ne pouvaient échanger d'énergie avec le rayonnement que par *quanta* $h\nu$. Ici la quantification se rapportait à l'échange d'énergie entre matière et rayonnement. Mais quelques années plus tard DEBYE devait faire de la quantification une propriété du champ électromagnétique lui-même.

Si l'on suppose le système enfermé dans une boîte à parois réfléchissantes (non absorbantes) un équilibre s'établira entre le rayonnement et la matière. Si alors on décompose le champ électromagnétique en série de Fourier, par exemple.

$$E_x = \sum_k q_k^{(x)} u_k(x, y, z, t) \qquad (10)$$

où $k$ numérote les diverses « fonctions propres » de Fourier et est en relation directe avec la fréquence de la composante de Fourier considérée, on montre que les équations de Maxwell se transforment en une série d'équations de « mouvement » pour les amplitudes telles que $q_k^{(x)}$ et ces équations ne sont rien d'autre que les équations du mouvement d'un oscillateur linéaire : par exemple.

$$\frac{d^2 q_k^{(x)}}{d t^2} + 4\pi^2 \nu^2(k)\, q_k^{(x)} = 0. \qquad (11)$$

Les « oscillateurs linéaires » ainsi définis oscillent indépendamment les uns des autres : cela signifie simplement que s'il n'existe à l'instant origine qu'une radiation de fréquence $\nu$ dans l'enceinte réfléchissante, on retrouvera indéfiniment la même fréquence, à moins d'intervention extérieure au système : il n'y a pas de dispersion du vide.

Ainsi l'étude de notre système continu, à une infinité continue de degré de liberté, caractérisé par la donnée en chaque point de l'espace-temps d'un certain nombre de fonctions (des grandeurs de champ) a été ramenée à celle d'un système discontinu à une infinité dénombrable de degrés de liberté, celle d'un ensemble dénombrable d'oscillateurs linéaires. Nous donner le champ dans l'ensemble du domaine considéré, ou nous donner l'état d'oscillation de tous nos oscillateurs linéaires, voilà qui apparaît complètement équivalent.

Ceci posé, l'idée de DEBYE était de quantifier ces *oscillateurs virtuels* comme PLANCK avait quantifié les oscillateurs matériels : un oscillateur électromagnétique ne pourrait « émettre » ou « absorber » d'énergie que par multiples entiers du quantum $h\nu$, $\nu$ étant sa fréquence. A chaque oscillateur correspondait un nombre entier $n$ caractérisant son énergie $nh\nu$, indiquant son *degré d'excitation* et qu'on appelait le nombre de photons de l'oscillateur virtuel. Si en effet on étudiait les échanges d'énergie entre ce rayonnement et un système matériel introduit dans la cavité à parois

12. Voir p. ex. de KRONIG, *Ann. Institut H. Poincaré*, 6, 1936, p. 213.

réfléchissantes, on constatait que de temps à autre un atome absorbait une énergie $h\nu$ tandis que le « nombre de photons » de l'oscillateur virtuel de fréquence $\nu$ diminuait d'une unité. C'était donc bien là les deux caractères qu'EINSTEIN attribuait au photon : absorption dans une région très limitée de l'espace, énergie égale à $h\nu$. C'est ce qui nous explique qu'on ait été ainsi conduit à appeler photon un degré d'excitation d'un oscillateur virtuel, sans relation aucune avec le concept corpusculaire que nous avons étudié dans les pages précédentes.

Mais nous l'avons vu, l'oscillateur virtuel est défini grâce à une boîte à parois réfléchissantes, la forme des fonctions $u_k$ dépend de la forme de la boîte (cubique, sphérique, etc...); en fait on prouve aisément que si l'on fait abstraction des longueurs d'onde du même ordre de dimensions que la boîte, la forme de celle-ci ne modifie pas les propriétés de quantification du système électromagnétique.

En tout cas, nous voyons que les grandeurs $q_k$ qui caractérisent désormais le système sont des grandeurs qui se rapportent au système entier. Il suffit de considérer la relation de définition (10) : nous avons justement séparé les grandeurs

$$u_k(x, y, z, t)$$

qui caractérisent l'état de chaque point du système à chaque instant et les grandeurs $q_k$. C'est la distinction entre grandeurs *locales* et grandeurs *globales* qui va être essentielle pour ce qui suit.

13. Reste à préciser la quantification de ces amplitudes. La mécanique quantique, après 1925, devait donner la réponse à cette question en montrant que, tout comme pour les oscillateurs matériels, il suffisait que la coordonnée $q_k$ et le moment correspondant $p_k$ fussent considérés comme des grandeurs non-commutables (matrices), satisfaisant à la relation fondamentale

$$p_k q_k - q_k p_k = \frac{h}{i} \qquad (12)$$

pour que l'énergie de l'oscillateur fût quantifiée. En remontant des amplitudes aux champs eux-mêmes d'après (10) et les relations analogues pour le champ magnétique, on aboutissait à des *relations de commutation* entre les champs eux-mêmes. On avait ainsi :

$$\begin{cases} [E_i(P_1), E_k(P_2)] = [H_i(P_1), H_k(P_2)] \\ = -ihc\left(\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t_1 \partial t_2}\delta_{ik} - \frac{\partial^2}{\partial x_{i_1}\partial x_{k_2}}\right)\Delta \\ [E_i(P_1), H_i(P_2)] = 0 \\ [E_i(P_1), H_k(P_2)] = +ih\frac{\partial^2}{\partial x l_2 \partial t_1}\Delta. \end{cases} \qquad (13)$$

Dans ces relations [A, B] signifie la différence AB-BA; $P_1$, $P_2$ représentent deux points de l'espace-temps $x_1y_1z_1t_1$; $x_2y_2z_2t_2$; les indices $ikl$ forment une perturbation paire de $xyz$. Quant à la grandeur $\Delta$, elle est l'analogue à quatre dimensions de la fonction singulière $\delta$ de DIRAC. On a :

$$\Delta = \frac{\delta(r+ct) - \delta(r-ct)}{r}. \qquad (14)$$

Elle est donc nulle partout sauf sur le cône double dans l'espace à quatre dimensions $r = \pm ct$ et l'on a

$$\int f(r,t)\,\Delta(r,t)\,dx\,dy\,dz\,dt$$
$$= \int \frac{dx\,dy\,dz}{r}\left[f(r=-ct) - f(r=+ct)\right].$$

Les relations (13) nous montrent les restrictions que la quantification apporte à l'utilisation de la notion de champ. En tout cas, la forme même de la fonction $\Delta$ nous montre que, comme son argument n'est différent de zéro que si les points $P_1P_2$ peuvent être reliés par un signal lumineux, que *les champs en deux points de l'espace-temps qui ne peuvent être reliés par des signaux lumineux commutent entre eux.*

BOHR et ROSENFELD ont étudié minutieusement les autres conséquences des relations (13) et ont indiqué les dispositifs expérimentaux, les *expériences idéales* qui permettent de les vérifier. Il faut ici en premier lieu tenir compte du fait que ne sont accessibles à l'expérience que les valeurs moyennes des champs prises sur une petite portion d'espace et durant un petit intervalle de temps. On montre alors que

$\alpha$) Les valeurs moyennes de deux composantes du champ électrique ou magnétique sur le même intervalle de temps mais des régions spatiales différentes sont commutables.

$\beta$) Les valeurs moyennes d'une composante du champ électrique et d'une composante du champ magnétique sur la même région spatiale mais des intervalles de temps différents sont commutables.

Supposons maintenant qu'on mesure les champs des deux domaines $D_1$ et $D_2$ de dimensions spatiales et temporelles respectives $L^3{}_1T_1$ et $L^3{}_2T_2$. Supposons que des signaux partis de $D_1$ puissent atteindre $D_2$ mais que la réciproque ne soit pas vraie. Pour simplifier nous poserons $L_1 = L_2 = L$, $T_1 = T_2 = T$, et nous désignons par $r$ la distance *spatiale* des deux domaines considérés. On a alors pour les incertitudes corrélatives sur les mesures des champs

$$(\Delta E_x)_{D_1}(\Delta H_y)_{D_2} \sim \frac{h}{r^2 LT} \quad (L \geqslant cT)$$
$$(\Delta E_x)_{D_1}(\Delta H_y)_{D_2} \sim \frac{h}{r^2 cT^2} \quad (L \leqslant cT) \qquad (15)$$

On voit comment la quantification des amplitudes (12) conduit à l'impossibilité de mesurer si-

multanément les champs en deux régions de l'espace : comme il était naturel, la mesure simultanée est d'autant plus précise que les deux domaines sont plus éloignés (présence de $r$ au dénominateur. Enfin, dans le domaine $L \gg cT$, nous voyons, en posant $r \sim L$ que l'on peut désigner par « champ caractéristique »

$$E_m = \left(\frac{h}{L^3 T}\right)^{1/2} \tag{16}$$

Si $E \gg E_m$, les restrictions apportées par la quantification seront peu sensibles. Si d'ailleurs nous prenons le cas d'une onde plane de fréquence $\nu$, écrire $E \gg E_m$ peut s'écrire

$$E^2 L^3 \gg \frac{h}{T}.$$

Or T ne peut être supérieur à $\frac{1}{\nu}$ (sans quoi la valeur moyenne de E s'annule), donc il est nécessaire que $E^2L^3$ soit supérieur à $h\nu$, c'est-à-dire que le nombre de photons $h\nu$ compris dans le volume $L^3$ soit très supérieur à l'unité. C'est bien ce à quoi on devait s'attendre.

Ainsi la quantification des champs conduit à admettre des relations de non-commutabilité entre les champs à distance. Si dans la théorie de Maxwell on pouvait se fixer comme conditions initiales d'un problème une répartition arbitraire de champ, cela n'est plus possible dans la théorie des quanta : il convient de tenir compte des restrictions apportées par les lois de quantification (13).

14. Revenons à l'oscillateur linéaire virtuel et à sa quantification (12). D'après la mécanique quantique, et en accord avec l'expérience, l'énergie d'un oscillateur matériel est donnée par

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right)h\nu = nh\nu + \frac{h\nu}{2}. \tag{17}$$

Il existe donc une *énergie au zéro absolu* ($n = 0$). On retrouve forcément cette énergie dans la quantification du rayonnement et comme le nombre d'oscillateurs est infini, cette énergie au zéro absolu est infinie.

On peut naturellement montrer que cette énergie échappe complètement à l'observation, puisque ne nous sont accessibles que les échanges entre oscillateurs électromagnétiques et oscillateurs matériels. Mais il est clair qu'il nous faudrait comprendre ici le pourquoi de l'apparition de cette énergie indésirable.

Il n'est pas possible non plus de dire qu'il s'agit d'une difficulté « formelle » de la théorie, parce que, comme nous allons le voir ,il n'est pas très difficile de la supprimer. Il ne semble pas possible en effet de faire de telles distinctions entre difficultés « formelles » et difficultés « physiques ». Il peut évidemment se présenter, comme dans tout problème de physique, des difficultés mathématiques (intégrations, divergences de développements en série, etc...) mais nous allons voir que le procédé utilisé pour supprimer la difficulté « formelle » de l'énergie du rayonnement au zéro absolu est loin d'être dépourvu de toute conséquence « physique ».

15. Pour cela, on admet que le champ électromagnétique, tout au moins dans le domaine quantique, n'est pas défini par les grandeurs habituelles E, H (champ électrique et champ magnétique), mais par de nouvelles grandeurs complexes F. La correspondance entre les nouvelles et les anciennes grandeurs de champ est donnée par :

$$\vec{E} = \frac{1}{2}\left(\vec{F} + \vec{F}^x\right), \qquad \vec{H} = \frac{\text{rot}}{\sqrt{-\Delta}}\left(\frac{\vec{F} - \vec{F}^x}{2i}\right) \tag{18}$$

L'opérateur $\frac{1}{\sqrt{-\Delta}}$ est un opérateur qui jouera un rôle essentiel dans ce qui suivra. On a :

$$\frac{1}{\sqrt{-\Delta}} f(x, y, z)$$
$$= -\frac{1}{2\pi^2} \int \frac{f(x', y', z')}{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} dx'\,dy'\,dz'. \tag{19}$$

Quant aux relations de commutabilité des F, elles sont données, en posant

$$D_{\frac{1}{2}}\left(\vec{x}\right) = \sqrt{-\Delta}\,\delta\left(\vec{x}\right) = \frac{1}{(2\pi)^3}\int (k) e^{i\vec{k}\vec{x}} dk_1\,dk_2\,dk_3,$$

$$D_{-\frac{1}{2}}\left(\vec{x}\right) = \frac{1}{\sqrt{-\Delta}}\,\delta\left(\vec{x}\right)$$

$$= \frac{1}{(2\pi)^3}\int \frac{1}{(k)} e^{i\vec{k}\vec{x}} dk_1\,dk_2\,dk_3 = \frac{1}{4\pi^2 r^2},$$

par

$$[F_i(x), F_j(x')] = [F^*_i(x), F^*_j(x')] = 0$$
$$[F_i(x), F^*_j(x')] = [F_j(x), F^*_i(x')] \tag{20}$$
$$= \frac{1}{2} hc \left\{ \delta_{ij} D_{\frac{1}{2}}(x - x') + \frac{\delta^2}{\delta x_i\, \delta x_j} D_{-\frac{1}{2}}(x - x') \right\}$$

qui, compte tenu de (18), sont complètement équivalentes aux relations (13).

En écrivant la théorie sous cette forme, la densité d'énergie est donnée par le produit $\frac{1}{2}$ FF* et l'on vérifie que la décomposition en oscillateurs virtuels donne toujours pour l'énergie de chacun de ces oscillateurs un nombre entier de quanta $h\nu$ sans énergie au zéro absolu.

Ainsi, en introduisant ces nouvelles variables de champ F, nous avons supprimé la difficulté de l'énergie au zéro absolu. Mais ce changement de variables n'a-t-il qu'un caractère formel ?

Tout d'abord nous voyons que les opérateurs introduits par (19) ne sont pas des opérateurs *locaux* (comme les opérateurs addition, soustraction, multiplication, qui agissent sur les valeurs au même point des fonctions sur lesquelles ils opèrent) : la fonction F $(x, y, z)$ par exemple ne résulte pas simplement des valeurs de E et de H au *même* point $xyz$, mais s'obtient par intégration sur les valeurs de E et H sur *tout* le domaine (avec malgré tout une prédominance des valeurs de E et H au point $xyz$ considéré). Ainsi les grandeurs de champ F sont des grandeurs *globales* à l'opposé de E et H, qui sont des grandeurs *locales* et nous voyons bien que c'est la quantification du champ, opération globale, qui est à l'origine de cette transformation.

C'est ce que nous allons voir de manière plus précise sur les relations entre champ électromagnétique et nombre de photons, mais notons de suite qu'en comparant (18) et (20) on peut écrire par exemple :

$$[E_i(x), F_i(x')] = -\frac{1}{2} hc \left( D_{\frac{1}{2}}(x - x') + \frac{\delta^2}{\delta x^2_i} D_{-\frac{1}{2}}(x - x') \right)$$

autrement dit le champ électrique « classique » $E_i$ et le champ électromagnétique « quantique » $F_i$ ne commutent pas entre eux : la connaissance précise de l'un d'eux exclut la connaissance précise de l'autre.

16. Revenons à la définition du nombre de photons. Ce nombre, d'après (10) est proportionnel à $q^x q$. Si nous tenons compte de (10) et (12), on trouve alors qu'entre le champ électrique d'une onde lumineuse et le nombre de photons N qu'elle comporte a lieu la relation de commutabilité

$$\vec{E} N - N \vec{E} = \vec{E}. \qquad (21)$$

C'est là un trait essentiel de la théorie de la quantification des champs. Cette relation montre en effet la relation très particulière qu'établit la théorie quantique des champs entre la description par champs et la description par photons des phénomènes électromagnétiques : si le champ de l'onde est connu, par là est indéterminé le nombre de photons. Si au contraire, nous connaissons le nombre de photons associé à l'onde, les champs associés à cette onde nous sont inconnus. En termes d'incertitude, (21) peut s'écrire
nus. En termes d'incertitude (21) peut s'écrire

$$\Delta E \Delta N \sim E. \qquad (22)$$

Ainsi si $\Delta E = E$, c'est-à-dire si l'erreur possible sur le champ électrique est de l'ordre de ce champ lui-même (100 %), le nombre de photons est connu à une unité près. Si nous savons que N a une valeur précise, par exemple $N = 1$, $\Delta E$ est infini. Autrement dit les relations (21) ne nous permettent pas d'attacher une signification déterminée à la notion de champ électromagnétique associée à *un* photon. Photon et champ apparaissent ici encore comme deux aspects différents (complémentaires au sens de Bohr) de la réalité du champ électromagnétique : aspect ponctuel, aspect global.

On peut d'ailleurs aller plus loin. Si $N = 0$, si aucun photon n'est présent, la valeur moyenne du champ E sera à coup sûr égale à zéro, mais $\Delta E$ n'est pas par là nulle : le champ fluctuera autour de la valeur zéro. Ce sont là *les fluctuations du champ au zéro absolu*, fluctuations qui, à proprement parler, n'ont pas de relations directes avec l'énergie au zéro absolu dont il a été question au paragraphe précédent, mais qui jouent un rôle important : tout d'abord comme l'ont montré BOHR et ROSENFELD, elles constituent un trait essentiel de l'électrodynamique quantique sans lequel il n'est pas possible de donner les expériences idéales démontrant l'absence de contradictions des relations (13); d'autre part ces fluctuations du champ au zéro absolu sont à l'origine, pour une large part, des difficultés connues sous le nom d'*énergie propre infinie de l'électron*, par l'interaction de l'électron avec ces fluctuations du champ, qui les mettent ainsi en évidence. Cette radiation joue un rôle quand on prend en considération les approximations supérieures de l'interaction entre matière et radiation [13].

17. On peut encore mettre en évidence la relation entre ces deux relations de non-commutabilité des grandeurs de champ et la quantification de l'énergie électromagnétique par un raisonnement dû à HEISENEBRG [14].

L'énergie électromagnétique contenue dans le volume $\Delta v$ est, d'après la théorie de Maxwell

$$\Delta W = \frac{1}{2}(E^2 + H^2)\, \Delta v.$$

Soit $\Delta l$ l'extension moyenne du volume $\Delta v$

$$v\ \left((\Delta l)^3 = \Delta v\right).$$

Dans le volume $\Delta v$, on ne peut mettre en évidence que des radiations dont la fréquence est $\nu < \frac{c}{\Delta l}$, car la mesure introduit une moyenne qui fait disparaître les composantes de fréquences plus élevées. Donc on a sûrement

$$\Delta W = \frac{1}{2}(E^2 + H^2)(\Delta l)^3 \geqslant \frac{hc}{\Delta l}.$$

13. L. LANDAU et R. PEIERLS : *Z. Physik* 69, 1931, 56; W. PAULI, *Z. Physik*, 18, 1923, 272.

14. W. HEISENBERG : Die Physikalische Prinzipien der Quantentheorie, p. 37.

Si E et H pouvaient être connus simultanément, il y aurait contradiction, car en diminuant $\Delta l$, le premier membre diminuerait rapidement, alors que le second membre augmenterait. Pour éviter cette difficulté, il faut que dans le volume $\Delta v$ les champs E et H ne puissent être connus simultanément avec une précision quelconque : on doit avoir

$$\Delta E \Delta H \geqslant \frac{hc}{(\Delta l)^4}$$

ce qui, en substance, n'est pas différent de (15). Ici encore on voit bien que l'origine de la non-commutabilité des champs est le fait que si l'on a reconnu la présence d'une radiation de fréquence $\nu$, l'énergie du champ est certainement supérieure à $h\nu$.

On notera en tout cas la forme du raisonnement précédent, en particulier l'accent qu'on y met sur l'impossibilité de mettre en évidence dans un espace d'extension linéaire $\Delta l$ les radiations de fréquence supérieure à $\frac{c}{\Delta l}$ : nous aurons l'occasion d'y revenir plus loin.

18. On peut encore donner aux relations (21) une forme qui met bien en évidence les difficultés qu'on éprouve à accoler sans plus les notions classiques du champ électromagnétique avec la notion de photon. Reprenons une onde plane, et soit N le nombre de photons qui lui correspond, $\varphi$ la phase de cette onde plane. Dans ces conditions de (21) on tire la relation de commutation

$$N\varphi - \varphi N = i \qquad (23)$$

et la « relation d'incertitude »

$$\Delta N \Delta \varphi = 1. \qquad (24)$$

Il s'ensuit que, si le nombre de photons est connu, la phase de l'onde (dont on sait le rôle essentiel dans les phénomènes d'interférence) est indéterminée. Réciproquement, si la phase de l'onde est connue, le nombre de photons est indéterminé. Autrement dit, il n'est pas possible de se demander quelle est la phase de l'onde électromagnétique associée à un photon. On peut remarquer encore avec HEITLER [15] que si l'on connaît la différence de phase de deux ondes, mais non leurs phases en valeur absolue, on peut bien déterminer le nombre total de photons, mais il est impossible de connaître leur distribution entre les deux ondes sans détruire la relation de phases en question.

Ceci nous montre combien il est difficile de se faire une représentation concrète simple de la notion de photon. Par exemple, on pourrait penser considérer une onde plane (position indéterminée mais fréquence parfaitement déterminée) comme particulièrement adaptée à la notion de photon, mais ce qui précède nous montre que même alors un élément essentiel de l'onde plane, sa phase, est indéterminée. Nous voyons d'ailleurs maintenant que cette relation (24) est nécessaire pour éviter toute contradiction dans l'explication des phénomènes d'interférence par la théorie quantique. Nous avons vu en effet au § 2 les difficultés qu'on éprouve à concilier les expériences sur les interférences à grande différence de phase avec la notion de photon. La relation (24) n'est en réalité que l'expression précisée de cet état de fait : elle nous montre les domaines respectifs d'application des concepts d'onde et de corpuscule.

*(A suivre.)*

**Jacques Solomon.**

15. W. HEITLER : The Quantum theory of radiation, p. 68.

# LA GÉOLOGIE DES COTES OCCIDENTALES DE L'AFRIQUE

## CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PALÉOGÉOGRAPHIQUE DE L'OCÉAN ATLANTIQUE

L'Océan Atlantique, avec ses 4.000 kilomètres, se trouve avoir exactement la même largeur que la Mésogée au cours des temps primaires, secondaires, voire tertiaires, mais il n'a pas donné naissance à des chaînes plissées récentes.

La surrection de grandes chaînes, ramenant à la surface les dépôts marins permet de reconstituer l'histoire et l'évolution des zones océaniques. L'histoire de l'Océan Atlantique est bien plus

compliquée du fait que nous ignorons complètement la constitution géologique du fond.

Nous n'entrerons pas ici dans des vues théoriques, ni ne reprendrons les théories de Wegener qui ont été souvent exposées et discutées. Nous voulons seulement étudier les grandes lignes de la géologie de l'Ouest de l'Afrique gondwanienne, depuis le Sud marocain jusqu'au Cap de Bonne-Espérance, aire limitée au Nord *et* au Sud par deux zones géosynclinales.

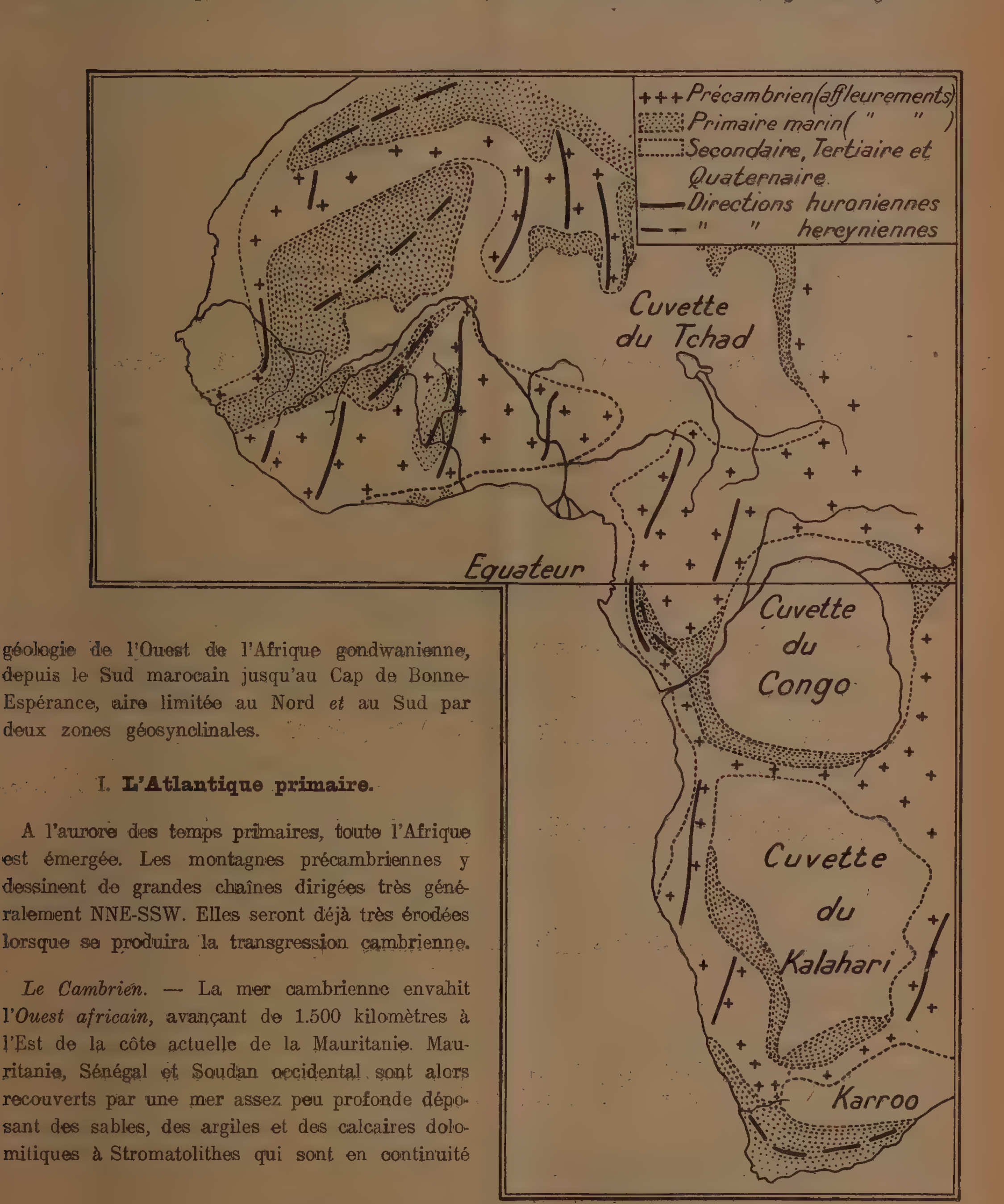



Fig. 1. — Carte des affleurements précambriens et primaires de l'Ouest africain.

### I. L'Atlantique primaire.

A l'aurore des temps primaires, toute l'Afrique est émergée. Les montagnes précambriennes y dessinent de grandes chaînes dirigées très généralement NNE-SSW. Elles seront déjà très érodées lorsque se produira la transgression cambrienne.

*Le Cambrien.* — La mer cambrienne envahit l'*Ouest africain*, avançant de 1.500 kilomètres à l'Est de la côte actuelle de la Mauritanie. Mauritanie, Sénégal et Soudan occidental sont alors recouverts par une mer assez peu profonde déposant des sables, des argiles et des calcaires dolomitiques à Stromatolithes qui sont en continuité

sur le terrain avec les calcaires dolomitiques à *Archaeocyathus* du Maroc (4,5).

Plus au Sud, en *Afrique équatoriale,* le système schisto-dolomitique du Gabon et du Congo est d'âge Cambro-Silurien et de même facies (17, 23).

Encore plus au Sud, en *Angola* (30), c'est la série du Bembé, encore schisto-dolomitique, dont il reste de vastes témoins dans le Nord, au NE de Loanda. Au Sud, on reconnaît le plateau de Humpata et celui de Coroco. Vers l'Est, ces formations schisto-dolomitiques ont recouvert tout le Congo belge. Vers le Sud, elles se relient sur le terrain au système schisto-dolomitique de Nama, au *Sud-Ouest africain,* puis à la série dolomitique de la *province du Cap.* Ici, les dolomies atteignent 2.000 mètres de puissance. On retrouve au Sud de l'Afrique une zone géosynclinale qui n'est pas sans analogies avec celle, mésogéenne, qui séparait au Nord l'Afrique de l'Eurasie.

Ce n'est pas une des choses les moins étonnantes à souligner, que cette identité de facies sur des milliers de kilomètres. Le Cambrien comporte des calcaires dolomitiques en Europe, au Maroc, en Mauritanie, au Soudan, au Gabon, au Congo, en Angola, au SW africain et en Afrique du Sud.

*Le Silurien, le Dévonien et le Carbonifère.* — L'Ordovicien montre un changement dans la sédimentation qui, de calcaire, devient sableuse.

Dans l'*Ouest africain,* la mer ordovicienne est allée plus loin vers l'Est que la mer cambrienne; elle s'est étendue jusqu'au Tibesti. Ses dépôts sont surtout représentés par des grès, blancs, roses ou rouges, à ripple-marks, avec des pistes et de très rares fossiles, des Lingules surtout. Ces grès, parfois très puissants, ont recouvert la Mauritanie, le Soudan, le Sénégal et la Guinée; ils y ont été conservés dans des zones relativement synclinales, tandis qu'ils ont été enlevés par l'érosion dans les zones où il ne reste plus que le soubassement cristallin.

Le Gothlandien marque un nouveau changement de facies; ce sont les minces dépôts de schistes à Graptolithes de Mauritanie, du Soudan et de la Guinée (5,12).

Au-dessus viennent les dépôts des mers dévoniennes, tantôt calcaires, tantôt gréseux et dont l'extension est inférieure à celle des dépôts ordoviciens, ce qui est certainement dû à l'érosion. Les changements de facies correspondent à des mouvements d'âge calédonien.

Au-dessus des couches à *Spirifer Verneuili* de la Mauritanie et du Soudan se trouvent des dépôts calcaires du Carbonifère inférieur et plus particulièrement du Viséen. Un niveau supérieur se trouve en Gold Coast.

A la fin du Viséen, des mouvements épirogéniques et orogéniques se produisent, déterminant un certain nombre de plis à grand rayon de courbure.

De l'*Afrique équatoriale,* vaste région sans fossiles, on ne peut dire grand'chose, si ce n'est que le système schisto-dolomitique est suivi d'un autre système, schisto-gréseux et que l'ensemble sera également plissé par des mouvements hercyniens.

En *Afrique du Sud,* nous serons plus heureux, car il y a des séries fossilifères.

Au-dessus des calcaires dolomitiques cambriens de Nama et du Cap, on retrouve une série de grès ordoviciens : ce sont les 1.500 mètres de grès de la Table, recouverts eux-mêmes par 800 mètres de schistes et de grès dévoniens, plus particulièrement du Dévonien inférieur, avec une faune de Trilobites et de Brachiopodes qui offre beaucoup d'affinités avec celle de l'Amérique du Sud.

A un moment du Dévonien, un soulèvement se produit et l'Afrique du Sud émerge.

Donc, après avoir été presque entièrement recouverte par les Océans primaires, l'Afrique émerge au Dévonien supérieur dans le Sud, à la fin du Viséen dans le Nord. Ce régime continental est marqué par le dépôt de couches à Plantes, en particulier *Lepidodendron* et *Sigillaria,* connues tant au Sahara qu'en Afrique du Sud.

## II. La régression hercynienne.

### Le continent africano-brésilien.

De nouveaux mouvements hercyniens, amènent des gauchissements qui sont soulignés par le dépôt en discordance des nouvelles formations continentales, qui se sont déposées dans de grandes cuvettes.

Ces formations (argiles et grès) sont d'âge relativement indéterminé dans le *Sahara occidental.* C'est ce que l'on appelle le Continental intercalaire; il est postérieur aux derniers mouvements hercyniens et antérieur à la transgression cénomanienne.

En *Afrique équatoriale,* ce sont les couches à *Glossopteris* de la Lukuga d'âge triasique et les couches du Lualaba, jurassiques.

En *Afrique du Sud,* l'ensemble porte le nom de couches du Karroo.

Au-dessus du Carbonifère continental à *Knorria* et *Lepidodendron* (couches de Witteberg) et en discordance, viennent les couches à *Lepidodendron* de Dwyka (Carbonifère supé-

rieur), les couches à *Glossopteris* de l'Ecca (Permien), les couches à *Glossopteris* et *Thinnfeldia* de Beaufort (Trias) les couches à *Thinnfeldia* de Stormberg (Jurassique).

Ces couches n'affleurent pas dans la région côtière; elles sont séparées du rivage par des reliefs comme le Mayombe en Afrique équatoriale. On peut penser que des cuvettes semblables occupaient une partie de l'Atlantique méridional alors émergé, puisque les faunes terrestres et les flores de l'Amérique du Sud sont très semblables à celles de l'Afrique. C'est le seul moment où l'on puisse assurer que l'Amérique du Sud et l'Afrique faisaient partie d'un même continent, gondwanien.

Ce n'est qu'au cours du Crétacé que nous allons voir la mer *réoccuper* une partie des régions qu'elle avait déjà recouvertes au Primaire et s'esquisser la forme générale des côtes actuelles.

## III. **La naissance de l'Atlantique actuel.**

Le Crétacé inférieur de la côte occidentale de l'Afrique est continental. Il porte des noms différents selon les régions : c'est le sommet du « Continental intercalaire » de l'Afrique occidentale française, la base des « Lower Grits » de Nigeria, les « Grés sublittoraux » de l'Afrique équatoriale, les « couches du Dondo » en Angola.

Ce sont des couches d'origine continentale, d'estuaires, de lacs, parfois de lagunes, souvent bitumineuses et pétrolifères, généralement recouvertes par la transgression albienne ou cénomanienne.

En Nigéria, au Cameroun, en Guinée espagnole et au Gabon, ces schistes bitumineux contiennent des Poissons du Crétacé inférieur : *Leptolepis*, *Proportheus*, *Parachanos* et *Lepidotus*. La puissance de cette formation, souvent salifère, atteint plusieurs centaines de mètres. Elle recouvre généralement le Cristallin, quelquefois le Primaire. En Afrique équatoriale et en Angola, ses affleurements forment une bande tout le long de la côte, entre le Cristallin et le Crétacé marin, bande d'une dizaine de kilomètres de largeur en Angola, plus importante au Nord, où elle souligne le golfe de l'Ogooué. Au Cameroun et en Nigeria, ces couches sont connues dans le bas Niger et la vallée de la Bénoué, s'étendant très loin vers le Nord, jusqu'au Damergou et au delà, régions dans lesquelles elles contiennent une abondance de *Ceratodus* (6, 16, 19, 22, 24).

*Le Crétacé inférieur et moyen.* — Dès le Crétacé inférieur toutefois, on voit la mer approcher des côtes occidentales de l'Afrique, les atteindre localement.

La Mésogée qui recouvrait alors les régions marocaines, allonge un golfe vers le Sud. On en retrouve les traces dans l'île de Maio (archipel du Cap Vert) où il y a 250 mètres de calcaires néocomiens à *Lytoceras sabaudianum*, *Lytoceras subfimbriatum*, *Crioceras Duvali*, etc.

Au Barrêmien, la transgression s'accentue. A Maio, on trouve cent mètres de calcaires bitumineux à *Crioceras Emerici* et *Pulchellia pulchella*, puis de l'Aptien à *Parahoplites Hitzeli* et *Psilotissotia Favrei*.

C'est au Barrêmien également qu'appartiennent les premiers dépôts crétacés de la côte méridionale. En *Angola*, à Salinas, près de Mossamédès, il y a des calcaires à *Pulchellia Caicedoi* et *Puzosia Matheroni*, puis des calcaires bitumineux à *Pholadomya pleuromyaeformis* vers le sommet (Aptien-Albien). L'Aptien est connu aux *Iles du Cap Vert*.

L'Albien marque le début de la grande transgression cénomanienne. On le trouve tout au fond du Golfe de Guinée, en *Nigeria*. C'est de l'Albien supérieur à *Perviquieria depressa*, *Pervinquieria quadrata*, *Elobiceras angustum*, *Elobiceras lobitense*, *Anisoceras perarmatum*.

Dans les Iles d'*Elobi*, les mêmes couches contiennent en abondance *Mortoniceras inflatum*.

Plus au Sud, en *Angola*, depuis Dombe Grande jusqu'à Benguella Velha, il y a des grès transgressifs de l'Albien, avec *Douvilleiceras mamillatum*, de nombreuses variétés de *Mortoniceras inflatum*, *Stoliczkaia dispar*, *Knemiceras Uhligi*.

Au Cénomanien, la transgression se précise. Le Golfe amorcé en *Nigeria*, dans la région de la Bénoué, s'enfonce très loin vers le Nord entre les zones cristallines de l'Afrique occidentale et du Cameroun. La mer cénomanienne arrive dans la région du *Tchad* et va rejoindre au cœur du Sahara une Méditerranée transgressive elle aussi, ne laissant subsister qu'une grande île, le Hoggar. Il se forme un long chenal, peu profond, isolant à l'Ouest une île importante (une partie du Soudan, la Mauritanie, le Sénégal, la Guinée, la Côte d'Ivoire, la Gold Coast et les régions voisines). Les gisements fossilifères du Damergou, de l'Adar Doutchi, etc. ont livré *Neolobites Vibrayeanus*, *Exogyra columba minor*, *Exogyra flabellata*, *Strombus incertus*, *Micropedina olisiponensis*, etc. Vers le sommet, on passe insensiblement au Turonien inférieur, avec des *Metengonoceras* et des *Vascoceras* en abondance. *Exogyra olisiponensis*, *Cardium productum*. Il s'agit toujours de mers très peu profondes ou voisinaient des Huitres, des Ammonites et des Oursins, que l'on trouve jusque dans les bancs gypsifères. Les faunes méditerranéennes passaient librement jusqu'au Golfe de Guinée (6).

En *Afrique équatoriale*, en *Guinée espagnole*,

et sur le Rio Muni, le Cénomanien a été reconnu (22).

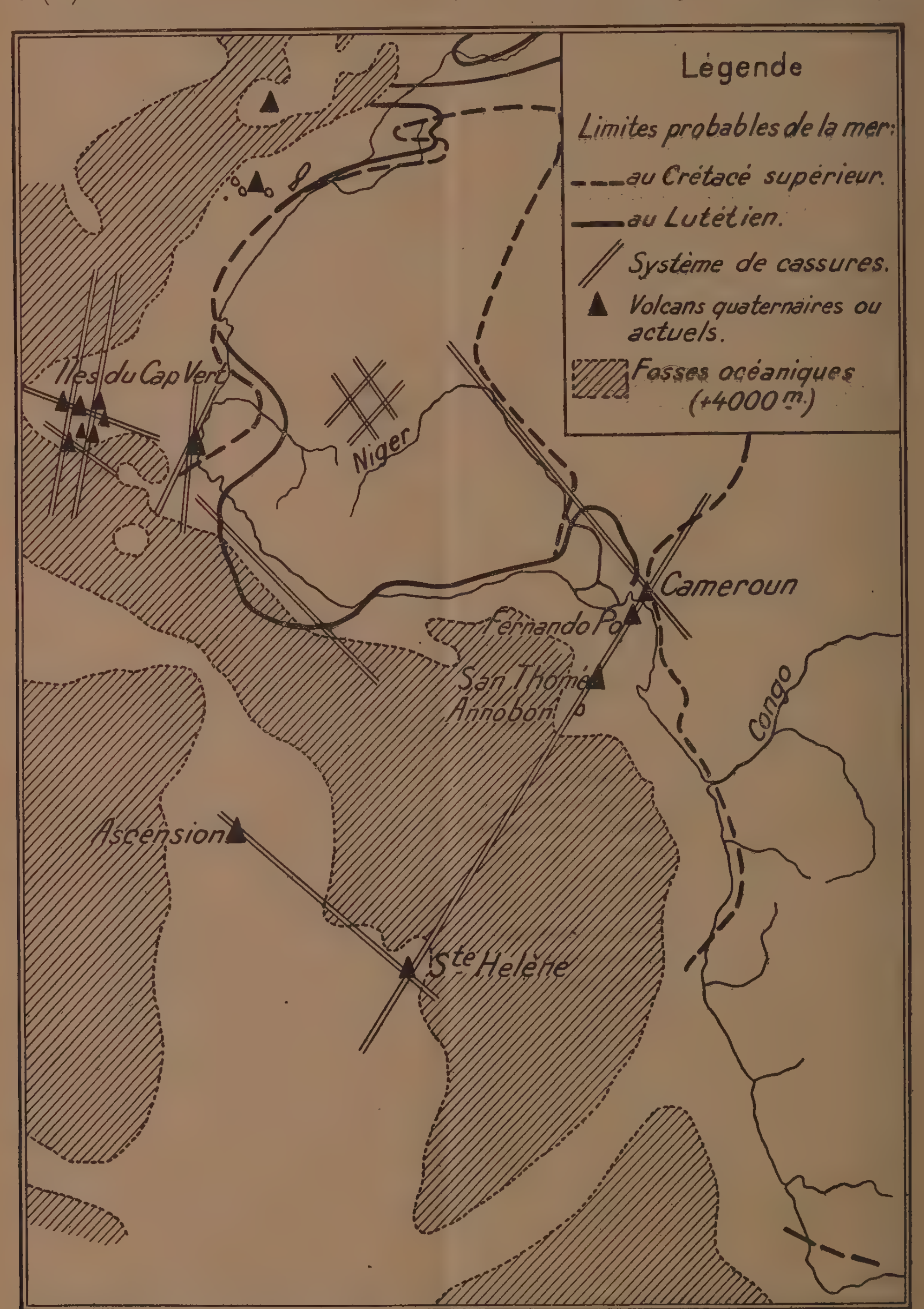



Fig. 2. — Extension des mers crétacées et tertiaires. Orientation des fractures. Volcanisme.

Plus au Sud (*Gabon et Congo*), le Cénomanien n'a pas été signalé avec certitude. Le Crétacé moyen borde toute la côte et s'enfonce assez loin dans le bassin de l'Ogooué, dessinant un golfe. Le Turonien est connu à Sibanga et Libreville, avec *Pseudotissotia Pavillieri*, *Inoceramus labiatus*, et

*Pholadomya Pedernalis* qui pourrait appartenir à un niveau inférieur.

En *Angola*, et tout particulièrement à Salinas, il y a du Cénomanien à *Desmoceras Toucasi*, *Acanthoceras Borgesi*, *Gaudryceras Salinarum*, puis du Turonien à *Prionotropis echinatum*, *Tylostoma globosum* et *Arca Thevestensis*. Le Turonien est ici recouvert par une couche de basalte (28).

*Le Crétacé supérieur.* — Au Sénonien, la mer couvre les côtes marocaines, la côte Sud étant toujours la bordure de la Gondwanie. Des côtes du Rio de Oro, on ne sait rien, mais on trouve la trace d'un golfe sénonien dans le bassin du *Sénégal*. Le plus bel affleurement se trouvait sous la gare de Dakar; on y a trouvé des Oursins : *Physaster inflatus* et *Stegaster Mairei*. Les autres gisements n'ont pas été retrouvés.

On ne connaît rien sur les côtes de Guinée, Sierra Leone et Liberia. De la Côte de l'Or, une seule découverte d'un fragment d'Ammonite.

Arrivant en *Nigéria*, on retrouve le golfe crétacé, débouché du chenal Méditerranée-Golfe de Guinée qui reprend toute son activité au Maestrichtien et au début du Danien. Dans les régions soudanaises les calcaires de cette époque ont livré *Libycoceras Ismaeli*, *Roudaireia auressensis*, *Alectryonia Nicaisei* et *Venericardia Beaumonti*.

La fin du Danien indique une tendance à l'émersion, marquée par des dépôts de gypse et des couches à Crocodiliens. C'est également au Danien que se rapportent les couches phosphatées.

Le Sénonien est connu tout au long des côtes du *Cameroun*, de la Guinée espagnole, du Gabon et du Congo français.

Les belles faunes du Cameroun appartiennent au Santonien, au Campanien et au Maestrichtien (25).

Au *Gabon* et au *Congo*, la côte est jalonnée de gîtes fossilifères et un golfe sénonien s'étend assez loin vers l'Est dans le bassin de l'Ogooué. Le Sénonien inférieur est représenté par des grès à *Mortoniceras texanum*, *Mortoniceras pseudo-texanum*, *Peroniceras Czörnigi*, *Trigonoarca Maresi*, *Plicatula hirsuta*, *Alectryonia dichotoma*; soit un ensemble Coniacien-Santonien.

Vers le sommet, les couches santoniennes changent de facies, deviennent siliceuses, puis phosphatées, ne contenant plus que des Foraminifères (en particulier *Gyroidina depressa*) du Campanien-Maestrichtien, puis on passe aux couches du Maestrichtien-Danien à *Venericardia Beaumonti*, dents de *Corax*, d'*Onchausaurus* Cf. *Pharao*, etc. qui se termine par des facies néritiques, grossiers, indiquant encore une émersion.

Les principaux gisements de cette côte, du Nord au Sud, partant de la Guinée espagnole, sont Bata, la région de Libreville, la lagune de Fernan-Vaz, la lagune d'Iguela, la lagune Setté-Cama, Pointe-Noire et la Fausse Pointe-Noire.




La côte du Gabon.
(1 : Précambrien ; 2 : Primaire ; 3 : Crétacé et Tertiaire ; 4 : Quaternaire).

Fig. 3. — Esquisse géologique de la côte du Gabon.




La côte du Mayombe.

Fig. 4. — Esquisse géologique de la côte du Congo.

En *Angola*, le Sénonien est développé au Nord de Benguella Vahla et au Sud de Dombe Grande. Ce sont des grès et des calcaires à *Libycoceras*, à

à *Roudaireia Forbesiana* et *Roudaireia Drui*, pouvant atteindre une épaisseur considérable, de l'ordre de mille mètres dans la région de Loanda.

En *Afrique du Sud*, la région du Cap était, elle aussi, envahie par la mer, comme elle l'avait été précédemment au cours du Crétacé.

Au total, le Sénonien est transgressif partout, après un Turonien supérieur nettement régressif. Le Maëstrichtien est particulièrement transgressif et le Danien est à son tour régressif.

*Le Nummulitique.* — Commençant par la côte marocaine, nous voyons tout au Nord, dès l'Eocène inférieur, le sillon riffain et une mer à Nummulites. Au Sud de l'Atlas, la mer éocène dessinait un golfe (Golfe du Tadla et Golfe du Souss) où les Nummulites sont remplacées par des Gastropodes, les Thersitées, et plus loin vers l'Est par des Turritelles. C'est l'époque des dépôts phosphatés, qui se trouvent au passage du Crétacé supérieur à l'Eocène.

De la côte du Rio-de-Oro, on ne sait toujours rien. Par contre, au *Sénégal*, il existe un golfe nummulitique s'étendant à 500 kilomètres dans l'intérieur, au delà de Matam. L'épaisseur des dépôts atteint et dépasse 200 mètres (3).

L'Eocène inférieur (Montien compris) comporte des calcaires à Turritelles et des niveaux phosphatés, avec des Echinides : *Linthia Delanouei, Plesiolampas Paquieri, Brissoides daradensis, Echinopsis Friryi, Echinopsis Jacqueti, Schizaster Douvillei, Echinolampas anceps, Echinolampas Jacqueti, Echinolampas Cuvillieri Echinocyamus cyphostomus, Echincyamus Jacqueti, Rhyncholampas daradensis et Anisaster gibberulus.*

L'Eocène moyen, le Lutétien; n'est pas connu en affleurement, mais il a été atteint dans de très nombreux puits, depuis Saint-Louis du Sénégal jusqu'au Sine Saloum (au total 53 localités fossilifères).

Les calcaires lutétiens, plus ou moins grossiers, ont livré une faune très caractéristique : *Nummulites irregularis, Nummulites distans* et *Nummulites Heeri* (du Lutétien inférieur), *Nummulites Gizehensis* var. *Vasseuri, Nummulites sub-Beaumonti* (du Lutétien supérieur).

La transgression lutétienne est suivie d'une régression. Les couches supérieures sont des sables et des argiles bigarrées d'origine continentale.

Au long des côtes de Guinée, il n'y a toujours rien. C'est en *Côte d'Ivoire* que l'on retrouve une bande côtière de sédiments éocènes. Depuis Fresco jusqu'à Assinie, il y a environ 25 mètres de marnes bitumineuses et de calcaires fort peu fossilifères. On n'y connaît qu'un Nautile (*Hercoglossa* cf. *cassiana*) (11) et un Gastropode (Bullia Adima) (1), représentant probablement l'Eocène inférieur, tandis que l'Eocène moyen serait représenté par des couches à Orthophragmines.

Les mêmes couches se retrouvent en *Gold Coast* et au *Togo*, tantôt bitumineuses, tantôt phosphatées et renferment au Togo : *Nautilus* cf. *Chudeaui, Fibularia* sp., *Turbinolia* sp., *Corbis* cf. *lamellosa, Turritella* sp.; des Poissons : *Myliobatis Dixoni, Odontaspis cuspidata, Odontaspis elegans.* C'est encore une faune de l'Eocène inférieur et moyen (9, 14).

En *Nigéria*, dans le Bas-Niger, il y a toujours un golfe, dont on ne sait plus s'il rejoint encore les mers sahariennes qui subsistent à l'Eocène inférieur. En Nigéria, il y a des calcaires à *Fibularia* et Orthophragmines, contenant 70 espèces de Mollusques et 44 espèces de Poissons dont l'âge n'est pas très certain, mais représente au moins l'Eocène moyen.

Arrivant sur la côte de l'Afrique équatoriale, nous retrouvons à peu près le même liséré de formations tertiaires.

Au *Cameroun*, dans la vallée du Mongo, le Lutétien est représenté par des calcaires à *Turritella Eschi, Cytherea nitidula, Cytherea elegans, Tellina subrotunda, Calyptraea trochiformis, Sycum bulbiforme.*

L'Eocène est indiqué beaucoup plus au Sud, sur la côte congolaise, à Loango (N. de Pte-Noire), Pointe-Noire même, à Cayo (Sud de Pte-Noire), mais les faunes sont extrêmement douteuses. Un gisement fossilifère encore plus méridional s'est révélé être Quaternaire.

On trouve de l'Eocène marin certain dans le territoire portugais de *Cabinda*, à l'embouchure du Chiloango, à Sasazao et Landana (30, 35).

La faune, très riche est considérée comme de l'Eocène inférieur et plus particulièrement du Montien. Il s'y trouve des Céphalopodes : *Hercoglossa Didderichi* et *Nautilus landanensis*; des Gastropodes et des Lamellibranches d'espèces particulières, locales ; des Poissons : *Lamna appendiculata, Odontaspis macrota, Myliobatis dispar*, etc.

La faune de Sasazao est assez semblable et serait susceptible de comprendre des niveaux supérieurs au Montien, éocènes en général.

En *Angola*, il faut aller jusqu'à Mossamédès pour trouver un nouveau gisement éocène. Ce sont encore des couches à Poissons, avec *Odontaspis cuspidata, Odontaspis macrota, Otodus obliquus*, attribués à l'Eocène inférieur.

*Le Néogène.* — Le Miocène est connu au large de la côte africaine, dans les *îles du Cap Vert*, mais son âge ne peut être précisé davantage, les rares espèces signalées ayant une grande extension stratigraphique (7).

Sur la côte, on connaît des blocs de calcaires à

Lépidocyclines à *Dakar* même. Ils sont considérés comme aquitaniens.

Il faut aller ensuite jusqu'en *Angola* pour retrouver des sédiments marins miocènes.

A Dombe Grande, près de Benguella, il y a de l'Aquitanien à *Lepidocyclina Canellei* et *Miogypsina irregularis*, sur 45 mètres d'épaisseur, en discordance sur le Nummulitique.

Au Nord de Benguella, la région de Loanda a fourni une grande quantité de fossiles : 41 espèces de Gastropodes, dont 21 sont connues dans le Burdigalien de l'Aquitaine, 28 espèces de Lamellibranches dont 15 en Aquitaine à des niveaux divers, des Poissons (29).

Citons en particulier : *Conus intermedius*, *Cypraea leporina*, *Semicassis diadema*, *Turritella Venus*, *Solarium carocollatum*, *Pecten expansus* *Chlamys scabrellus*, *Lucina columbella*, *Cardium hians*, etc.

Au cours du Miocène, de grands changements se produisent. C'est la fin du géosynclinal mésogéen, l'abordage des boucliers, la surrection et le plissement des zones faibles, les voussures, le craquement des vieilles plates-formes.

Il y a de grandes cassures et de grands effondrements en Afrique orientale, il y en a d'autres dans l'Ouest africain, de même âge et parallèles suivant deux directions : NW-SE et NE-SW.

Ce sont des lignes directrices en Afrique : Côte de Guinée-Sierra Leone-Liberia, Bas-Niger de Gao à la mer pour le sens NW-SE, cours du haut Niger et grand axe Ste Hélène-Fernando Po-Cameroun pour le sens NE-SW.

Toutes ces régions sont ondulées, gauchies et craquelées en menus parallélépipèdes.

Les cassures tant néogènes que quaternaires ont été accompangnées de venues basaltiques : on en connaît deux séries successives aux Iles du Cap Vert (miocène et quaternaire), à Dakar, au Cameroun, etc.

Le repos n'est pas encore venu. Les mouvements posthumes, quaternaires, des grandes chaînes marocaines (2) sont accompagnés de mouvements des côtes africaines. La grande régression post-tyrrhénienne modifie beaucoup la côte, ainsi que la dernière transgression. Les îles du Cap Vert sont assez stables tandis que les côtes de Mauritanie et du Sénégal se soulèvent d'une centaine de mètres. Tout au contraire, les côtes de l'Afrique équatoriale indiquent une zone faible ayant une tendance à s'ennoyer ainsi qu'en témoignent les lagunes et les estuaires envahis par la mer. En Afrique du Sud, au contraire les côtes sont généralement soulevées.

*

De cet exposé, nous retiendrons un certain nombre de conclusions :

1° Les mers primaires ont largement recouvert l'Afrique aussi bien que l'Amérique du Sud et l'Océan Atlantique primaire était infiniment plus large que l'Atlantique actuel ;

2° Les dépôts, primaires en particulier, sont de même facies du Nord au Sud de l'Afrique sur 8.000 kilomètres ; il n'y a donc pas lieu de s'étonner outre mesure de l'identité des facies africains et américains qui ne sont séparés que par des distances bien moindres ;

3° Le continent africano-brésilien n'a pu exister que du Carbonifère au Crétacé inférieur ; l'Atlantique-Sud présente un caractère de pононanence ;

4° Tous les grands événements qui ont intéressé les régions géosynclinales et plissées ont eu leur répercussion sur la côte africaine où on les retrouve *enregistrés* : mouvements calédoniens, mouvements hercyniens, transgressions barrêmienne, cénomanienne, puis maestrichtienne, régression danienne puis transgression éocène. Vers la fin, on voit la régression post-lutétienne, une transgression miocène, puis une émersion générale accompagnée de cassures et de venues volcaniques, qui sont apparemment de même âge que les grandes cassures de l'Afrique orientale. Les directions de ces fractures sont les mêmes dans toute l'Afrique : NE-SW et NW-SE. Elles ont rejoué au Quaternaire, où l'on observe de nouveaux épanchements volcaniques et une tendance à l'immersion des zones équatoriales.

La côte continue à être parfaitement instable, témoignant de la vie active de la rive africaine de l'Atlantique.

**Raymond Furon.**

## BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

### AFRIQUE OCCIDENTALE

1. Aubert de la Rüe (E.) : Sur un mollusque fossile de la Côte d'Ivoire. *C. R. S. Géol. Fr.*, 1928, pp. 206-208.

2. Bourcart (J.) : Premiers résultats d'une étude sur le quaternaire marocain. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1927 (4), t. XXVII, p. 1.

3. Flandrin (J.) et Jacquet (F.) : Les Nummulites de l'Eocène moyen du Sénégal. *B. Soc. Géol. Fr.*, 1936 (5), t. VI, pp. 363-373, 1 pl.

4. Furon (R.) : Présentation d'une échelle stratigraphique pour les terrains paléozoïques de l'Afrique occidentale. *C. R. Ac. Soc.*, 1933, t. CXCVII, p. 1055-1057.

5. Furon (R.) : Essai sur l'Evolution structurale de l'Afrique occidentale. *B. Ag. Gén. Colonies*, 1935, n° 293, pp. 1036-1066, 1 carte.

6. Furon (R.) : Le Crétacé et l'Eocène du Sahara soudanais (Soudan, Niger, Tchad). *Arch. Museum Nat. Hist. Nat.*, 1935, t. XIII, 100 p., 7 pl.

7. Furon (R.) : Notes sur la géologie des Iles du Cap-Vert. *B. Muséum Nat. Hist. Nat.*, t. VII, pp. 270-274.

8. *Geological Survey of Nigeria* (Publications du).

9. Kouriatchy (N.) : Contribution à la connaissance de la géologie du Togo. *B. Com. Et. A. O. F.*, 1933, t. XVI, n° 4, 135 p., 1 carte.

10. Lambert (J.) et Jacquet (F.) : Les Echinides fossiles du Sénégal. *B. Soc. Géol. Fr.*, 1936 (5), t. VI, pp. 339-361, 3 pl.

11. Malavoy (J.) : Découverte d'un Nautile dans la région de Fresco (Côte d'Ivoire). *C. R. S. Géol. Fr.*, 1935, pp. 236-237.

12. Monod (Th.) : Sur la constitution géologique de l'Adrar mauritanien. *C. R. Ac. Sc.*, 1937, t. CCV, p. 74.

13. Monod (Th.) : Essai de synthèse structurale de l'Ouest saharien. *Mélanges Géogr. et Orient. à F. Gautier*, Tours, 1937, pp. 368-387.

14. Oppenheimer (P.) : Die eocäne Invertebratenfauna des Kalksteins in Togo. *Beitr. Geol. Erf. D. Schutzg.*, 1915, h. 12, 126 p.

AFRIQUE EQUATORIALE

15. Amstutz (A.) : Contribution à l'étude géologique du Congo français. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1929, t. XXIX, pp. 321-327, 1 carte.

16. Arambourg (C.) et Schneegans (D.) : Poissons fossiles du bassin sédimentaire du Gabon. *Ann. Paléont.*, 1935, t. XXIV, pp. 139-160.

17. Babet (V.) : Etude géologique de la zone du chemin de fer Congo-Océan et de la région minière du Niari et du Djoué. Paris (Larose), 1929, 176 pp., 1 carte.

18. Babet (V.) : Observations géologiques dans la partie méridionale de l'Afrique équatoriale française. Paris (Larose), 1932, 148 pp., 1 carte.

19. Babet (V.) et Furon (R.) : Sur les formations continentales post-hercyniennes de l'Ouest africain (Afrique occidentale et équatoriale. *C. R. Ac. Sc.*, 1935, t. CCI, pp. 86-88.

20. Choubert (B.) : Etude géologique des terrains anciens du Gabon. Paris, 1937, 210 pp., 1 carte.

21. Denaeyer (M.-E.) : Carte géologique de l'Afrique équatoriale (1/6 000 000) *in* Atlas des Colonies, 1934.

22. Denaeyer (M.-E.) : Los terrenes secundarios y terciarios de la Guinea española y del territorio portugués de Cabinda. *Mem. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, 1929, pp. 699-724.

23. Furon (R.) : Contribution à l'étude géologique du Gabon. Avec 1 carte géologique en collab. avec B. Brajnikov et V. Perebaskine. *Rev. Géo. Phys. et Géol. dynam.*, Paris, 1930, pp. 363-373.

24. Mann (O.) et Hennig (E.) : Mesozoische Ablagerungen in Adamaua (Kemerun). *Beitr. Geol. Erf. D. Schutzgeb.*, 1913, 3 fig., 1 pl.

25 Riedel (L.) : Die Oberkreide vom Mungoflss in Kamerun und ihre Fauna. *Beitr. Geol. Erf. D. Schutzgeb*, 1933, h. 6, 155 p., 33 pl.

26. Schneegans (D.) : La faune des couches sénoniennes du bassin du Moyen Congo entre Pointe-Noire et M'Vassa. *C. R. S. Géol. Fr.*, 1932, p. 220.

AFRIQUE PORTUGAISE ET AFRIQUE DU SUD

27. Denaeyer (M.-E.) : Los terrenos secundarios y terciarios de la Guinea española y del Territorio portugués de Cabinda. *Mem. Soc. R. Esp. Hist. Nat.*, 1929, t. XV, pp. 699-724.

28. Douvillé (H.) : Les Ammonites de Salinas. *Bul. Mus. Miner. Geol. Fac. Sc. Lisboa*, 1932, n° 1, 32 p., 4 pl.

29. Douvillé (H.) et Keller (H.) : Le Tertiaire de Loanda. *Id.*, 1933, n° 2, 58 p., 7 pl. et 1934, n° 3, 34 p., 5 pl.

30. Leriche (M.) : Les Poissons paléocènes de Landana (Congo). *Ann. Musée Congo belge*, 1913, t. I.

31. Mouta (F.) et O'Donnell (H.) : Carte géologique de l'Angola (1/2.000.000) avec une Notice explicative. Lisbonne, 1933, 87 pages.

32. Range (P.) : Geologie Deutsches Namalandes. *Beitr. Geol. Erforsch. D. Schutzgeb.*, Berlin, 1912, t. II.

33. Rogers.

34. Spath (L.-F.), — On cretaceous Ammonoidea from Angola, collected by Pr. J.-W. Gregory : *Trans. R. Soc. Edinburgh*, 1922, v. LIII, pp. 91-160.

35. Vincent (E.) : Contribution à la paléontologie des falaises de Landana (Bas-Congo) Mollusques. *Ann. Musée Congo belge*, 1913, t. I.

# BIBLIOGRAPHIE

## ANALYSES ET INDEX

### 1° Sciences physiques et chimiques.

**Duclaux** (J.). — **Mouvement Brownien. I. Partie expérimentale. Traité de chimie physique, t. II, chap. V.** — *Un vol. in-8° de 96 pages avec 15 figures. (Collection des Actualités Scientifiques et Industrielles). Hermann, Paris*, 1937.

Parmi toutes les preuves que l'on possède aujourd'hui de la réalité moléculaire, l'une des plus directes a été le succès des théories du mouvement brownien.

On trouvera dans le présent ouvrage une étude critique de ces théories et la description des nombreuses expériences qui ont été tentées en vue de les vérifier. Mais on sait que M. Jacques Duclaux n'est pas un admirateur béat des théories les mieux assises, qu'il les soumet toujours à une critique implacable et qu'en définitive, bien peu trouvent grâce à ses yeux. C'est d'ailleurs là ce qui fait le grand intérêt de ces publications qui suscitent toujours chez le lecteur de profitables réflexions.

« L'élégance d'une doctrine, écrit-il fort justement, et la valeur de ses conclusions, ne doivent pas nous pousser à dissimuler ses faiblesses ». Aussi, ne manque-t-il pas d'appeler l'attention sur les faiblesses indiscutables des théories, pourtant très remarquables, que Smoluchowski et Einstein ont données du mouvement brownien. Sans doute, a-t-on trouvé un accodr presque parfait entre le calcul et l'expérience; mais en mettant les choses au mieux, il ne paraît pas douteux que cet accord soit le pur effet du hasard. Aussi, des progrès dans ce domaine, où tant de recherches ont déjà été accumulées, sont-ils encore possibles et souhaitables. L'ouvrage que nous signalons paraît particulièrement propre à les stimuler.

Après avoir rappelé les études de caractère qualitatif du mouvement brownien, l'auteur expose les vérifications expérimentales de la théorie moléculaire, aborde ensuite l'étude des émulsions, envisage les divers aspects du mouvement brownien et consacre un chapitre particulièrement intéressant au mouve-

ment brownien dans les gaz. Il termine par l'étude du phénomène dit « effet Ludwig-Soret » relatif à une inégale distribution d'un sel dans une solution dont la température n'est pas uniforme, qui mérite de retenir spécialement l'attention des chercheurs.

A. BOUTARIC.

**Jorgensen** (H.). — **Théorie, mesure et application du pH.** — 1 *vol.* 13 × 21, *de* VII-351 *pages. Edit. Dunod, Paris*, 1938 (*Prix, broché : 68 fr.*).

Ce livre a été rédigé au Laboratoire de la *Dansk Gaerings-Industri* (Société danoise des industries de fermentation) par un savant particulièrement qualifié, digne élève du Professeur SÖRENSEN, qui a écrit la préface.

En bref, le plan du livre est le suivant : Dans une *première partie* sont présentées les notions de chimie théorique les plus importantes pour l'intelligence de la question du pH. La *deuxième partie* constitue un exposé pratique des méthodes de mesure du *pH* : méthodes colorimétrique et potentiométrique. La *troisième partie* apporte une série d'exemples, choisis dans les domaines les plus divers, d'application pratique de ces mesures.

L'ouvrage, qui ne fait pas double emploi avec ceux de Leonor MICHAËLIS et de Mansfield CLARK, est d'une lecture aisée, grâce à l'excellente traduction qu'en a faite M. GUÉRON, Docteur-ès-Sciences.

Cet exposé est à la fois bref et complet, clair et concis et suffisamment détaillé sans superfluités. Il se consulte rapidement grâce à un index alphabétique soigneusement établi. Il n'est pas douteux qu'il rendra, à tous les usagers du *pH*, les meilleurs services. Nous souhaitons à cette remarquable publication la large diffusion et le plein succès qu'elle mérite.

E. CATTELAIN.

**Ruchmann** (M. et B.), *de l'Institut Physico-Technique de Kharkhov.* — **Low Temperature Physics (Physique des basses températures).** — 1 *vol. de* 313 *pages. Cambridge University (Prix, relié : 18 sh.).*

Ce livre sur les basses températures nous a paru d'une conception originale et d'une réalisation très attrayante. L'originalité consiste à avoir traité à la fois les problèmes classiques qui ont été à l'origine de la Physique des basses températures (liquéfaction des gaz) et les problèmes les plus modernes impliquant les notions d'orbites électroniques et de spin (parahydrogène, magnétisme, réfrigération magnétique, supraconductivité, etc.). Les auteurs passent progressivement d'un de ces groupes de problèmes à l'autre en montrant l'interpénétration des concepts macroscopiques de condensation et de fusion et des concepts atomiques de moment magnétique et de conductibilité électronique.

La question des basses températures a reçu aujourd'hui un tel développement que les auteurs ont cru devoir passer rapidement sur certains de ses aspects les mieux connus et les plus souvent exposés, tels que la théorie des chaleurs spécifiques, pour insister davantage sur des problèmes comme celui de la stabilité des structures cristallines à basse température. La partie théorique du sujet est traitée avec beaucoup de discrétion et d'une façon volontairement fragmentaire dans les divers chapitres de l'ouvrage. Par contre les auteurs ont donné un développement justifié au côté technique du problème de la réfrigération (principe, description, rendement des principales machines modernes pour la liquéfaction des gaz). L'approche de plus en plus serrée du zéro absolu n'est pas seulement une lutte pour un record industriel, c'est un effort pour observer la matière dans des états de plus en plus différents de l'état normal, offrant une chance rationnelle de découvrir des propriétés nouvelles des corps (supraconductivité, dégénérescence quantique, etc.). M. et B. Ruhemann ont su présenter cette évolution de nos moyens d'étude avec une compétence, une clarté et une absence de pédantisme qui rendent la lecture de leur livre agréable même pour un physicien non spécialisé. Nous estimons que leur ouvrage doit rencontrer auprès du public cultivé l'accueil très favorable qu'il mérite par son excellente présentation.

Léon BLOCH.

## 2° Sciences naturelles.

**Jaccottet** (J.). — **Les Champignons dans la Nature « Les Beautés de la Nature ».** — 1 *vol.*, 227 *pages, illust.*, 76 *planches hors-texte, Delachaux et Niestlé, Neuchatel et Paris,* 32, *rue de Grenelle, VII*e, 2e *éd.*, 1938.

Tout ce qu'il faut savoir comme naturaliste amateur et comme collecteur de champignons se trouve dans ce volume de poche. Il est écrit à l'usage des non-scientifiques et son but pratique ne fait aucun doute : il le remplit d'ailleurs pleinement, heureusement. L'introduction fait état de l'histoire et des croyances populaires, la distinction entre vénéneux et comestibles, les récoltes, préparation et conservation, les utilisations diverses, la culture. L'auteur, mycologue averti, expose une classification élémentaire faisant la part très grande aux Basidiomycètes, c'est-à-dire aux macrocryptogames qui fournissent la majorité des espèces tant alimentaires que nocives. Texte et schémas sont à ce point clairs qu'ils suffiraient à la rigueur pour l'identification des espèces décrites mais la valeur de cet ouvrage est magnifiée par 76 reproductions splendides d'aquarelles de Paul-A. Robert. Ces hors-textes, de 14,8 × 10,5, sont une merveille de ressemblance, avec fonds un peu chargés peut-être mais un respect de la forme et de la couleur, un bonheur dans la présentation qui confèrent à ce volume une remarquable note artistique et une valeur pratique devant rallier les suffrages les plus exigeants. La table qui le termine englobe les termes scientifiques et les dénominations communes. Je le recommande chaleureusement.

R. S.

**Lefèvre** (J.). — **Manuel Critique de Biologie.** — *1 vol., 1.048 pages, illus. Masson et Cie, édit., Paris,* 1938.

Livre entièrement nouveau, condensant de grands traités d'anatomie, de physiologie, de biochimie humaine et animale, rédigé originalement et représentant l'enseignement que l'auteur dispense aux élèves du Laboratoire de Bioénergétique qu'il dirige. Après une introduction générale sur la méthode et sur les grands problèmes de la Biologie, l'ouvrage se compose de cinq parties :

I. La cellule en général : *Cytologie.*

II. Les cellules fonctionnellement différenciées : *Histo-physiologie.*

III. Les groupements cellulaires organisés pour le métabolisme de la matière vivante : *Fonctions de nutrition.*

IV. Les groupements cellulaires systématiquement organisés pour l'unité vitale de l'être dans ses réactions à l'excitation : *Fonctions nerveuses et sensorielles.*

V. Le métabolisme énergétique de la cité cellulaire organisée et unifiée : *Bioénergétique et machine animale.*

Si l'on n'a ni parcouru ce volume, ni lu attentivement certains chapitres, l'on ne peut, sur le vu du titre ou l'exposé de ses divisions, se faire une idée du nombre et de la qualité des indications fournies et de la mine de renseignements, les uns bien connus, les autres moins, que contient ce manuel. Deux tables le terminent : l'une générale, l'autre alphabétique très détaillée.

R. S.

**Miomandre** (Francis de). — **Mon Caméléon « Scènes de la Vie des Bêtes ».** — *1 vol., 219 p., illus., planches hors texte, Albin Michel, édit., Paris,* 1938.

Dans cette collection, l'on se propose de faire connaître et comprendre l'esprit d'animaux, familiers ou non, domestiques ou sauvages, de décrire leurs réactions, leurs mœurs en partant d'observations personnelles, d'expériences précises, faites par des auteurs à la fois naturaliste et écrivain. Le premier volume de ces « Scènes de la Vie des Bêtes » est on ne peut plus représentatif de l'esprit de la collection. Il est l'œuvre d'un homme de lettres distingué; il concerne un animal fort peu connu ou plutôt mal connu. Cette histoire de Séti, le caméléon égyptien, vivante depuis la rencontre dans la cage d'une vieille rue d'Aix-en-Provence jusqu'à sa mort, sa très belle mort, en passant par les voyages multiples faits avec ses protecteurs, ses adaptations à l'existence libre dans un appartement parisien, ses chasses, ses émois, ses rancunes, ses nostalgies, jusqu'à ses sentiments affectueux, soit tous les éléments de cette symbiose foyer de l'auteur-Séti; cette histoire, dis-je, ne peut manquer de provoquer un engouement subit, quelque peu intempestif, pour un Reptile qu'il eût été sans cela peu commode de trouver sympathique. Le charme joue : c'est même une épopée qui en vaut d'autres humaines, avec une certaine affabulation. L'ouvrage comprend deux parties : douze chapitres sur Séti constituent la première. L'autre, de caractère général, et davantage scientifique, éthologique à un degré insigne, très utile par conséquent, parachève ce curieux volume De très belles photographies hors texte l'illustrent, le rendant amusant et instructif. Paraîtront ensuite dans cette série des monographies se rapportant au Chameau, due à la plume de Finbert, au Castor (Conibear), au Lion (Agnès Herbert) : elles doivent combler une lacune zoologique de quelque importance.

R. S.

## 3° Sciences médicales.

**Laignel-Lavastine.** — **Histoire générale de la Médecine,** *tome* I, 682 *pages, nombreuses illustrations dans le texte et hors texte, Albin Michel, édit.* 22, *rue Huyghens, Paris.*

Entreprise audacieuse de traiter l'histoire de la Médecine et de la Chirurgie, de l'Art dentaire, de la Pharmacie et de la Médecine vétérinaire depuis les origines, dans tous les pays, de retracer celle de toutes les affections connues, qu'elles aient virtuellement cessé d'exister, qu'elles soient d'apparition et de dépistage récents. C'est pourtant à cette tâche que l'éminent et distingué professeur d'Histoire de la médecine, de la Faculté de Paris, a estimé devoir se consacrer, en s'entourant d'une élite de collaborateurs. L'ouvrage formera trois gros et forts volumes, de format $22 \times 28$, de chacun 600-700 pages avec 600 illustrations en héliogravure et une trentaine d'hors-textes, fac-similés de documents et d'autographes. Cette iconographie de 1.800 gravures et une centaine d'hors-textes seule, à en juger par celle ornant le tome premier, est absolument unique et remarquable.

Ce volume initial, précédé d'une introduction par L. L., comprend la Paléopathologie et la Médecine dans la Préhistoire (Félix Regnault), la Médecine assyrienne et babylonienne (Georges Contenau), la Médecine égyptienne (R. Fournier-Begniez), la Médecine grecque jusqu'à la mort d'Hippocrate (Gaston Baissette) et après Hippocrate (Gilbert Médioni), la Médecine latine (Paul Seidmann), Galien (par le même auteur), les Médecins grecs depuis la mort de Galien jusqu'à la fin de l'Empire d'Orient (Félix Brunet), la Médecine indoue, la Médecine iranienne (Jean Filliozat), la médecine arabe (J. Sanjurjo d'Arellano), la Médecine en Chine et au Japon (George Soulié de Morant), la Pharmacie dans l'Antiquité (Maurice Bouvet), l'Art dentaire dans l'Antiquité (Raymond Boissier), la Médecine vétérinaire dans l'Antiquité (Prof. Emmanuel Leclainche).

Certes, l'histoire des doctrines et des méthodes médicales, de l'évolution de cette science et de cet art a toujours excité la sagacité des chercheurs et l'on ne compte pas les volumes, dissertations inaugurales, mémoires et notes y relatifs rédigés en toutes langues. Si notre Pays s'est mis tard à apporter sa contribution, l'œuvre que je signale aujour-

d'hui surclasse en qualité, par sa conception et l'ampleur des problèmes traités, par la richesse des images et la sûreté de jugement qui a présidé leur choix, surclasse en qualité, dis-je, tous les essais antérieurs. Cette somme, si elle s'adresse avant tout au médecin, intéressera l'homme cultivé; elle est inépuisable, inextinguible par l'enseignement et les joies d'ordre très divers que dispense sa lente lecture.

R. S.

**Laroche** (Guy). — **La Puberté.** — *Editeur Masson.*

Guy Laroche, étoile de première grandeur de cette pléiade de Bicêtre illuminée par le génie de Charles Foix nous donne un beau livre sur la Puberté. Il avertit (ses collaborateurs n'ont pas toujours écouté son avertissement) que les rythmes biologiques appelés à se dérouler dans cette période de la vie, entre toutes, dangereuse sont d'une grande complexité et que les engrenages fonctionnels sont essentiellement variables d'un rappel à l'autre. Les médecins sont sur une mauvaise piste avec leurs idées simplistes sur les déclenchements morbides. Ils restent hypnotisés par les découvertes modernes des hormones et des fibres sérieuses sigitatives. Sans doute leur importance est grande, mais le plus souvent leur rôle est de corrélation et non de déclenchement. Il faut actuellement apporter un esprit synthétique dans l'étude des déroulements rythmiques et placer hormone et système végétatif à leur juste place au lieu de systématiquement les mettre au premier plan.

René PORAK.

## 4° Art de l'Ingénieur.

**La Technique des Industries Chimiques.** — 1 *vol. in-4° de* 258 *pages*; *Editions* Science et Industrie, *Paris,* 1938 (*Prix, broché :* 60 *fr.*).

La technique des industries chimiques fait l'objet d'un copieux numéro hors-série des Editions « Science et Industrie », suivant la formule très heureuse qu'elles appliquent chaque année à diverses industries.

On ne s'étonnera pas que le nombre et la variété des études contenues dans cet ouvrage en interdisent toute véritable analyse. L'étendue même du sujet abordé conduit à se demander s'il n'aurait pas été préférable de le fractionner et de consacrer, par exemple, un numéro spécial à l'électro-chimie, un autre à l'industrie des peintures, pigments et vernis, etc.

Nous exprimons du moins le vœu que, l'an prochain, la classification suivie soit rendue plus apparente par l'adoption de quelques grandes rubriques qui, après un exposé général, groupent les études concernant des industries connexes ou voisines.

Soulignons que l'ouvrage, qui réunit les signatures les plus autorisées en la matière, est présenté avec grand soin et abondamment illustré.

Ph. TONGAS.

**Raymond** (J.). — **L'Urbanisme à la portée de tous** (Librairie Dunod). — **Centre de Biologie Industrielle.** — **Hygiène et Industries** (4 *fascicules*).

A l'éloge de notre époque, — parfois si abondamment décriée —, il faut mentionner le souci louable qu'elle a témoigné pour le développement de l'hygiène collective.

Sans doute notre pays avait dans ce domaine à rattraper un retard important sur les résultats déjà obtenus à l'étranger. Mais l'élan est maintenant donné et va s'amplifiant sans cesse.

L'Urbanisme a connu ces vingt dernières années un essor important. Mais il reste encore tellement à faire en ce domaine! Le petit livre de M. RAYMOND vient à son heure. Après avoir étudié l'évolution des villes, de l'antiquité à nos jours, il évoque sobrement les problèmes que posent l'hygiène de la rue et de la maison, la structure de la cité, la réalisation des espaces viaires (chaussées, carrefours, places, etc.) et celle des espaces libres (parcs, jardins, terrains de jeux, etc.), et trace les directives essentielles dont doivent s'inspirer les allotissements et les cités-jardins, qui sont appelés à désencombrer les villes.

Sous l'impulsion de MM. F. et H. HEIM DE BALZAC, le *Centre de Biologie industrielle du Conservatoire des Arts et Métiers* se préoccupe de la mise en harmonie avec l'hygiène des principales industries, spécialement les industries chimiques. Les quatre fascicules déjà publiés par lui sont les premiers d'une longue série qui sera consacrée à l'étude des facteurs nocifs du travail et aussi à leur prophylaxie rationnelle.

Ils seront consultés utilement par tous les intéressés.

Emile FABRÈGUE.

## 5° Divers.

**Brunschvicg** (Léon). — **La physique du vingtième siècle et la philosophie.** — 1 *vol. in-8° de* 32 *pages.* Collection des Actualités Scientifiques et Industrielles. *Hermann, Paris,* 1936. (*Prix* : 10 *fr.*).

Ce que le philosophe demande au prodigieux développement des sciences de la nature, c'est, en le renseignant sur l'univers, de lui assurer par là le contact de l'esprit qui a constitué l'édifice de la science. Dressant un tableau d'ensemble des principales étapes de la pensée scientifique, depuis l'aube de la civilisation, en insistant tout particulièrement sur les récents progrès de la physique, M. Brunschvicg montre l'influence du réel sur les progrès de nos conceptions philosophiques et scientifiques. « Les moments décisifs du progrès qui s'est accompli depuis le début du siècle, sont marqués d'un même caractère paradoxal et bienfaisant. Au point de départ l'échec des prévisions fondé sur les théories qui paraissaient le mieux établies, en face d'une résistance de la nature que les plus ingénieux artifices ne peuvent vaincre. Au terme, le rétablissement de l'équilibre intellectuel ».

M. Brunschvicg examine, de ce point de vue, les théories de la relativité, celles de l'atome, la mécanique ondulatoire, et cet examen critique le conduit aux plus pénétrantes remarques sur le cheminement de la pensée scientifique et la valeur même de la science.

A. B.

**Haslett** (A.-W.). — **Les problèmes non résolus de la Science.** — *Traduit de l'anglais par J. Buhot et J. Rossignol.* — 1 *vol. in-8°*, 349 *pages. Hermann et Cie, Paris*, 1938.

Ce livre éveillera la curiosité de beaucoup de studieux en raison de la diversité véritablement encyclopédique des questions traitées, dont voici le sommaire : I. L'éternelle recherche. II. La Création de l'Univers. III. Existe-t-il d'autres mondes que le nôtre? IV. Ce monde changeant. V. Notre chaudière du temps. VI. Messages de l'espace. VII. L'origine de l'homme. VIII. Les débuts de la civilisation. IX. L'homme est il une machine? X. L'énigme du sexe. XI. Les matériaux de la nature. XII. Mathématique au sens commun? XIII. Le secret de la Force. XIV. La nature bat l'homme de science. L'auteur qui est membre de la Somestine Foundation Scholar of King's College, Cambridge s'est proposé de divulguer non seulement à l'usage du grand public, mais surtout à celui des savants qui s'intéressent aux questions en dehors de leur compétence, les progrès les plus récents de la science en soulignant les échecs avec humour et même un peu de malice, sans nulle préoccupation des systèmes philosophiques. En fait, la lecture de ce livre paraîtra aussi amusante qu'instructive.

G. Malfitano.

**Passemard** (Mme Luce). — **Les statuettes féminines paléolithiques, dites vénus stéatopyges.** 1 *vol. in-8°*, 151 *pages*, 16 *planches hors-texte, Teissier, Nîmes*, 1938 (*Prix* : 50 *fr.*).

Entre 1892 et 1930, on a découvert une trentaine de statuettes féminines, préhistoriques, en France, en Belgique, en Italie, en Allemagne, en Tchécoslovaquie, en Russie et en Sibérie. Leur âge est considéré comme Paléolithique supérieur, Aurignacien.

Ces documents épars ont été découverts à des époques différentes, et publiés de divers côtés. On en a beaucoup discuté, parce que la plupart de ces statuettes montrent des formes opulentes; certains archéologues en furent si frappés que ces figurines reçurent le nom de « Vénus stéatopyges ».

Il n'y a pas de Congrès où l'on ne discute sur cette « stéatopygie ». Mme Luce Passemard a repris toute la question et son ouvrage est précieux à bien des points de vue. Il y a d'abord le recensement complet des statuettes aurignaciennes; il y a une très importante figuration, de qualité. Ensuite, chaque statuette étant soigneusement décrite, la question de la stéatopygie est traitée. On s'aperçoit alors qu'on a abusé d'un terme qui ne veut exprimer étymologiquement qu'un certain engraissement de la région fessière, passant quelquefois à des cas pathologiques. En réalité, il vaudrait mieux renoncer à un terme dont le sens a été dénaturé. Les statuettes féminines du Paléolithique ne représentent pas des femmes affligées d'une maladie rare et curieuse, mais un idéal de formes opulentes et un idéal de fonction. C'est l'indice d'un culte de la Fécondité, extrêmement ancien.

R. Furon.

# ACADÉMIES ET SOCIÉTÉS SAVANTES

## DE LA FRANCE ET DE L'ÉTRANGER

### ACADEMIE DES SCIENCES DE PARIS

*Séance du 24 Avril 1939.*

1° Sciences mathématiques. — **Ch. Ehresmann** : *Sur la topologie des groupes simples clos.* — **H. Hopf** : *Sur la topologie des groupes clos de Lie et de leurs généralisations.* — **P. Hebroni** : *Sur les équations différentielles linéaires dans un anneau de certaines matrices continuisées (matrices hyperboliques) et leurs applications à certaines équations intégrodifférentielles.* — **N. Obrechkoff** : *Sur les zéros des polynomes.* — **J. Marcinkiewicz** : *Sur l'interpolation d'opérations.* — **L. Bers** : *Sur une représentation intégrale des fonctions biharmoniques dans les domaines possédant une surface frontière remarquable.* — **P. Couderc** : *Sur les auréoles lumineuses des Novae.* L'auteur montre que l'auréole observée sur *Nova Persei* s'est propagée avec une vitesse variable, d'abord supérieure à celle de la lumière. De l'examen des clichés et d'une étude de la brillance théorique dans l'auréole, il tire des conclusions sur la répartition et la structure des nébulosités et sur leur nature.

2° Sciences physiques. — **C. Salceanu** et **H. Mc Cormick** : *Nouvelle méthode pour la détermination de la tension superficielle des liquides, basée sur la pesée des gouttes tombantes.* — **E. Baumgardt** : *Sur la mesure de certaines constantes élastiques adiabatiques des cristaux, par voie ultrasonore.* En utilisant le phénomène de la diffraction de la lumière par les ultra-sons, l'auteur a mesuré la vitesse du son dans un certain nombre de lames de sel gemme, et il en a déduit le module d'élasticité $c_{11}$. Les valeurs obtenues concordent parfaitement avec celles que Rose a trouvées en mesurant la fréquence propre d'un vibrateur composé. — Mlle **A. Dammann** : *Analyse de sons musicaux.* L'auteur a enregistré au moyen de l'oscillographe cathodique les sons donnés par

différents instruments de musique : trombone, trompette, flûte, clarinette et violon, et analysé les enregistrements obtenus qui sont riches en harmoniques. — **M. Parodi** : *Sur un phénomène de propagation d'ondes. Application à la thermodynamique.* — **Quang-Te-Tchao** et **H. Le Boiteux** : *Sur le coefficient d'absorption des petits ions par les particules neutres en suspension dans l'air.* Les auteurs ont trouvé pour le coefficient $\alpha$ la valeur $1,62.\ 10^{-7}$. Ils en déduisent qu'il y aurait 10 paires d'ions environ produites par $cm^3$ et par seconde dans l'atmosphère. — **M. Rouault** : *Analyse de Fourier des diffractions d'électrons par les molécules libres.* — **Choong Shin Piaw** : *Sur les spectres d'absorption de l'acide salicylique et de ses sels alcalins en solution aqueuse.* — **P. Rouard** : *Sur un saut de phase de $2\pi$ dans la réflexion métallique.* L'auteur montre comment l'existence de ce saut peut être établie au moyen des formules classiques que fournit la théorie électromagnétique et qui permettent de calculer l'amplitude et la phase de l'onde réfléchie à partir des éléments caractérisant l'onde incidente, des indices des milieux traversés et de l'épaisseur du métal. — **S. S. Lu, Chang Hung-Chi** et **Lu Ta-Yuan** : *L'influence de la pression sur la sensibilité photographique aux rayons X.* — **G. Dupouy** et **Ch. Fert** : *Pouvoir rotatoire magnétique de l'eau lourde. Dispersion et variation thermique.* [Λ] croît de 1 % environ au-dessus de 0° et tend vers une limite qui est pratiquement atteinte au voisinage de 70°. — Mlle **C. Chamié** : *Sur les groupements d'atomes des radiocolloïdes.* L'auteur suppose que la formation de groupements colloïdaux obéit à une loi de probabilité ; par conséquent, un radiocolloïde soluble dans un acide fort aura encore une certaine probabilité de former des groupements, alors que pour un cristalloïde cette probabilité est nulle. — **Tsien San-Tsiang** : *Sur les groupes de protons émis lors de bombardement de substances hydrogénées par les rayons $\alpha$.* Les groupes émis lors de collision avec les particules $\alpha$ correspondent aux niveaux de résonance du noyau composé $^{8}_{3}Li$. — **V. Kostomaroff** : *Influence des tensions chimiques et de la grosseur du grain sur les propriétés magnétiques d'un fer pur ou d'un fer au silicium.* Un examen basé uniquement sur le nombre de taches de Laue et leur orientation ne suffit pas pour définir les qualités magnétiques d'un fer pur. Celles-ci peuvent varier en sens inverse de l'état de cristallisation ainsi défini. — Mlle **S. Veil** : *Introduction de solutés ultérieurs dans l'iodure de potassium aqueux et répercussion électrostatique.* La solution primaire de KI, qui manifeste une répercussion électrostatique nette à l'introduction de AgI et d'$HgI^2$, ne présente rien de tel dans le cas d'introduction de $PbI^2$. Dans ce cas, il y aurait simple interposition d'une structure accessoire dans une structure fondamentale, sans perturbation essentielle pour celle-ci. — **E. Darmois** et Mlle **M. Théodoresco** : *Sur le spectre Raman des molybdates neutres, à l'état cristallin et en solution aqueuse.* — **M. Ballay** : *Propriétés de quelques bronzes d'aluminium au glucinium.* Pour des vitesses de refroidissement relativement faibles, les bronzes d'Al au Gl donnent aisément des structures hypertrempées. La résistivité de ces alliages est à peu près indépendante de la température de réchauffage après trempe. — Mme **P. Ramart-Lucas** : *Structure et absorption des colorants hydroxylés dérivés du triphénylméthane. Sur l'existence de deux formes isomères colorées des phénol-sulfone-phtaléines et des phénolphtaléines.* Les formes colorées de ces substances doivent être représentées par une structure quinonique. Chacune existe sous deux formes colorées, dont l'isomérie, nouvelle, peut s'expliquer par une différence de certains des angles valenciels. — **D. Bodroux** et **R. Thomassin** : *Sur quelques dérivés des ortho et paracyclohexylphénols.* — **R. Quelet** et **J. Ducasse** : *Chloroalcoylation du p-propylanisol ; application à la synthèse de quelques dérivés.* — **R. Paul** : *Action du nickel de Raney sur les alcools. Probabilité d'une combinaison du catalyseur avec les récepteurs d'hydrogène.* L'arrêt de la déshydrogénation avant que la réaction soit totale paraît attribuable à une fixation de la cétone ou de l'aldéhyde formée sur les centres actifs du catalyseur. — **R. Lombard** : *Contribution à l'étude des acides pyroabiétiques.* Les acides intermédiaires produits au cours de la pyrogénation de l'acide abiétique sont simplement des cristaux mixtes contenant de l'acide abiétique à côté d'acides pyroabiétiques. — **Z.-Ch. Glacet** : *Réductions condensatrices.*

*Séance du 24 avril 1939.*

1° Sciences naturelles. M. — **Jean Houghton Brunn** : *Nouvelles observations sur la bordure sud-ouest du sillon albano-thessalien en Grèce.* — M. **Jean Lugeon** : *Un altimètre intégrateur pour sondage aérologique.* Il est maintenant possible, grâce aux nouveaux principes exposés dans la présente Note, de réaliser un altimètre enregistrant automatiquement l'altitude de la radio-sonde pendant son vol. Il suffit de synchroniser sur la radio-sonde la rotation du disque des pressions et l'élongation des températures, ce qui est facile, en passant mécaniquement par les courbes d'étalonnage du baromètre et du thermomètre, découpées sur des cames de correction amovibles, propres à chaque radio-sonde. — MM. **Albert Arnulf, René Bernand, Démètre Cavassilas** et **Georges Déjardin** : *Nouvelle description du spectre du ciel nocturne dans la région ultraviolette.* — M. **Georges Deflandre** : *Les stéphanolithes, représentants d'un type nouveau de coccolithes du Jurassique supérieur.* — M. **Pierre Dangeard** : *Sur quelques Algues marines nouvelles pour le Maroc occidental.* — Mlle **Madeleine Fourcroy** : *Sur la non-continuité de la zone génératrice interne des racines jeunes.* Les arcs intra-libériens seuls sont générateurs d'éléments conducteurs et méritent seuls d'être considérés comme des tronçons de zone génératrice. Les arcs ligneux ne sont en relation qu'avec les naissances des radicelles et conditionnés par elles. L'auteur démontre ainsi la discontinuité de la zone génératrice interne de la racine, dans l'espace et dans le plan, et par suite l'inexistence de la ligne continue et sinueuse qui figure dans les schémas des Traités de Botanique, dès la fin de la différenciation de la phase alterne. — M. **René Souèges** : *Embryogénie des Polémoniacées. Développement de l'embryon chez le Polemonium caeruleum L.* L'embryon de *P. caeruleum* se rapproche de celui du *Myosotis* par ses formes hexa-

et dodécacellulaires, par le mode de division de l'élément $l$ de la tétrade et par la différenciation d'une épiphyse. Il se rattache à celui des Solanacées par les destinées des quatre éléments de la tétrade, par l'origine et le mode de séparation des initiales de l'écorce au sommet radiculaire. — M. **Roger Gautheret**: *Sur la mesure de la croissance des tissus de Carotte cultivés* in vitro. Grâce à des mesures précises l'auteur a pu démontrer que ses cultures se développent aux dépens des éléments nutritifs qui leur sont offerts. Rien ne permet de prévoir que leur développement puisse ne pas être illimité. — M. **Henri Devaux**: *Un rapport remarquable entre la constitution cellulaire et la mouillabilité du corps des mousses.* Pour la plupart des Mousses il existe une mouillabilité différente des deux générations : les affinités de la génération à $n$ chromosomes étant nettement hydrophiles, tandis que les affinités de la génération à $2n$ chromosomes sont lipoïdiques ou hydrolipoïdique. On serait donc tenté de rapporter cette différence de mouillabilité à la différence du nombre des chromosomes, mais on a pu doubler le nombre de chromosomes de la première génération sans remarquer une modification de ses tissus. C'est donc très probablement dans la constitution même des molécules issues de la fécondation qu'il faut chercher la cause du phénomène observé. — M. **Marin Molliard**: *Nouvelles recherches sur la production de tubercules chez la pomme de terre en milieu aseptique.* Il peut se produire une tubérisation normale chez la pomme de terre en milieu aseptique, à partir de la graine préalablement stérilisée, à condition de fournir au milieu nutritif un certain nombre de substances et en particulier du sucre. On est donc en droit de penser qu'il n'est d'aucune utilité qu'un organisme symbiotique intervienne dans le phénomène de la tubérisation et que celui-ci serait le résultat du seul jeu des propriétés physiologiques de la plante qui en est le siège. — M. **Gustave Guittonneau** et Mlle **Suzanne Haas** : *Sur un* Sporotrichum *agent de la maturation normale de certains fromages.* — MM. **Maurice Rangier** et **Pierre de Traverse** : *Acide glycuronique urinaire et urochrome.* — M. **Lucien Dautrebande** : *Boîte filtrante* antigaz *de haute capacité neutralisante et répondant aux exigences de la physiologie respiratoire.* Le dispositif décrit associe les indispensables qualités chimiques et physiques qu'on doit réclamer d'un appareil antigaz aux exigences de la physiologie respiratoire. La boîte décrite présente aux différents débits du repos et de l'effort une perte de charge particulièrement faible : 10 mm. d'eau à 1.500 litres/heure, 22 mm. à 4.000 litres/heure et 46 mm. à 7.000 litres/heure. — M. **René Catala** : *Accélération par des chocs de la métamorphose des chenilles de* Chrysiridia madagascariensis *Cram.* (*Uranidae*). La métamorphose peut, sous l'action de chocs ou d'attouchements se produire bien avant que la chenille de *Chrysiridia* n'ait achevé sa croissance et n'ait effectué la totalité de ses mues. — M. **Albert Vandel** : *Recherches sur la génétique d'*Armadillidium vulgare (*Latr. dans ses rapports avec la monogénie.* La mutation *cooperi* d'*A. vulgare* est dominante sur la forme type. Cette dernière semble correspondre à un type génétiquement pur. Les quatre femelles *cooperi* mises en élevage se sont montrées hétérozygotes, en sorte que tous les croisements effectués représentent des croisements de retour. Les chiffres obtenus montrent que la mutation et la forme type ne diffèrent que par un seul facteur mendélien. Le mode de coloration *cooperi* n'est pas un caractère lié au sexe ; c'est un caractère autosomique. Trois des femelles *cooperi* mises en élevage sont monogènes (productrices d'individus d'un seul sexe). Chez les femelles monogènes la disjonction des facteurs autosomiques est normale. La répartition des facteurs autosomiques suit donc, chez les femelles monogènes, les lois du hasard, tandis que la répartition des gènes sexuels obéit à un mécanisme préférentiel. — M **Albert Peyron** : *Sur les homologies entre les vésicules embryonnaires de l'œuf humain et celles des embryomes parthénogénétiques.* L'ensemble des faits décrits ne laisse aucun doute sur l'identité morphologique des œufs tératologiques produits en série par une lignée souche néoplasique d'origine mâle, avec ceux de la gestation utérine normale. — M. **Jean Loiseleur** : *Sur le mécanisme de l'action des diastases du groupe trypsique.* L'évolution de la charge électrique d'un protéide soumis à l'action de la trypsine témoigne de l'existence d'une combinaison entre la diastase et le protéide, la vitesse de l'hydrolyse étant proportionnelle à l'intensité de cette combinaison initiale. — M. **Jean Lavollay** et Mme **Françoise Laborey** : *Définition du coefficient d'action du magnésium vis-à-vis d'*Aspergillus niger *: ses variations avec la composition du milieu.* La détermination de ce coefficient permet de mettre en évidence une interdépendance nette entre la proportion convenable du magnésium et la teneur du milieu en éléments minéraux (azote compris), et par contre une certaine indifférence de la proportion du magnésium vis-à-vis du glucose. — MM. **Robert Duschinsky** et **Jean Jeannerat** : *Obtention des acides aminés naturels à partir des racémiques au moyen de la d-amino-acide-oxydase.* — Mme **Simone Villeneuve-Brachon** : *Sur la division et la formation du péristome des* Licnophora (L. Chattoni *n. sp.*) (*Ciliés Hétérotriches*). — Mlle **Georgette Cordier** : *Adsorption du virus aphteux par le charbon d'os et le phosphate tricalcique. Applications à l'immunisation chez le cobaye.* Le virus aphteux en suspension à 1 pour 100 peut être entièrement absorbé par le carbone animal de même que par le phosphate tricalcique ; le virus n'est pas détruit. Le carbone végétal, le carbone de noix de coco ne jouiraient pas du même pouvoir. Un état d'immunité à l'égard du virus se crée déjà après une première injection du complexe chez le cobaye ; l'injection seconde d'un complexe de concentration double renforce considérablement le pouvoir de résistance de cet animal, vis-à-vis de la fièvre aphteuse. — MM. **Marius Piéry**, **Joseph-F. Martin**, **Jean Enselme** et **Carlos Peschiera** : *Etude expérimentale de l'influence biologique d'un séjour prolongé à l'altitude. Les modifications pulmonaires.* Après un séjour de 6 mois à l'altitude de 3.457 m. on constate : 1° Les cœurs d'oies ne présentent pas de lésions. Les cœurs de lapins présentent des lésions inconstantes. 2° Les poumons sont tous congestifs, et ils contiennent d'autant plus de fer que la congestion est plus intense. 3° Si l'on rapproche ces résultats des chiffres trouvés pour la saturation oxygénée du sang chez les mêmes animaux, on voit que là où le fer est le plus élevé, la congestion la plus marquée, la saturation est aussi la plus basse. Les lésions pulmonaires sont donc particulièrement marquées. Provoquées par l'altitude, elles ne tardent pas à aggraver les effets de cette altitude et à diminuer encore la saturation sanguine contribuant par là à augmenter l'anoxémie puis l'anoxie.

*Le Gérant :* Gaston Doin

Sté Gle d'Imp. et Edit., 1, rue de la Bertauche, Sens.— 12-39.